



TITLE:

車群交通流モデルによる渋滞現象 解析(Dissertation_全文)

AUTHOR(S):

塩見, 康博

CITATION:

塩見, 康博. 車群交通流モデルによる渋滞現象解析. 京都大学, 2008, 博士
(工学)

ISSUE DATE:

2008-09-24

URL:

<https://doi.org/10.14989/doctor.k14145>

RIGHT:

車群交通流モデルによる渋滞現象解析

2008 年 7 月

塩見 康博

目次

第 1 章	序論	1
1.1	研究の背景と目的	1
1.2	論文の構成	3
第 1 章	参考文献	6
第 2 章	交通流解析と交通流理論の系譜	9
2.1	概説	9
2.2	マクロ交通流モデル	9
2.3	ミクロ交通流モデル	11
2.4	交通流静的モデル	12
2.5	高速道路単路部におけるボトルネック現象	13
2.6	既存の研究に対する本研究の位置づけ	14
第 2 章	参考文献	16
第 3 章	連続する車両の走行速度相関に基づく車群判定手法	19
3.1	概説	19
3.2	既往研究での追従走行車両と自由走行車両の判別手法	19
3.3	データの概要	20
3.3.1	東北自動車道下り線 93.2kp 地点	20
3.3.2	東海北陸自動車道上り線 72.6kp 地点	23
3.4	車頭時間と連続 2 車両の走行速度相関の関係	25
3.4.1	東北自動車道下り線 93.2kp 地点	26
3.4.2	東海北陸自動車道上り線 72.6kp 地点	34
3.5	結語	38
第 3 章	参考文献	39
第 4 章	車群形成モデルによる希望走行速度分布と車群台数分布の推定	41
4.1	概説	41
4.2	既往研究のレビューと本研究の位置付け	42
4.2.1	希望走行速度分布推定手法	42
4.2.2	車群台数分布推定手法	43
4.3	希望走行速度分布及び車群台数分布推定手法の構築	45
4.3.1	車群形成モデルの構築	45

4.3.2	車群形成モデルに基づく希望走行速度分布推定手法	48
4.3.3	車群形成モデルに基づく車群台数分布推定手法	49
4.4	データの概要	50
4.4.1	データの取得	50
4.4.2	車群の判定	52
4.5	希望走行速度分布の推定	53
4.5.1	希望走行速度分布推定のための条件設定	53
4.5.2	希望走行速度分布の推定結果	57
4.5.3	推定希望走行速度分布の妥当性検証	60
4.6	車群台数分布推定手法の検証	63
4.6.1	車群台数分布推定のための条件設定	64
4.6.2	車群台数分布の推定結果	66
4.7	結語	66
第4章	参考文献	70
第5章	ボトルネック通過時の車両走行特性の把握	73
5.1	概説	73
5.2	データの概要	73
5.2.1	データの取得	73
5.2.2	ボトルネックの特定	74
5.3	渋滞発生時の車両挙動	76
5.3.1	渋滞発生時の車線利用率	76
5.3.2	観測地点別の走行速度遷移状況	83
5.3.3	車群中車両走行速度遷移に関する仮説の措定	84
5.4	前方走行車両速度と相対速度の関係	86
5.4.1	前方車両走行速度水準別の相対速度	86
5.4.2	観測地点別の相対速度	90
5.5	車群中車両相対速度の無相関性	92
5.5.1	相対速度の無相関性検定方法	92
5.5.2	相対速度の無相関性の検証	92
5.5.3	相対速度自己相関についての考察	94
5.6	結語	96
第5章	参考文献	98

第 6 章	渋滞発生確率推定モデルの構築と適用	99
6.1	概説	99
6.2	渋滞発生時交通量変動メカニズム	99
6.2.1	既往研究のレビュー	99
6.2.2	本研究での視点	100
6.3	渋滞発生確率の定義	101
6.4	車群渋滞発生確率の算出法	102
6.4.1	相対速度分布に基づく車群中車両走行速度分布	102
6.4.2	マルコフ連鎖への近似	103
6.5	渋滞発生確率推定手法の構築	105
6.5.1	走行速度遷移確率行列の算定	105
6.5.2	渋滞発生確率の計算フロー	109
6.6	渋滞発生確率の推定	111
6.6.1	渋滞発生確率推定のための条件設定	111
6.6.2	渋滞発生確率推定結果	111
6.7	片側 1 車線区間ボトルネックにおける渋滞対策効果検討	113
6.7.1	希望走行速度分布と渋滞発生確率の関係	113
6.7.2	ペースカー導入効果の検証	116
6.8	結語	122
第 6 章	参考文献	123
第 7 章	結論	125
7.1	本研究のまとめ	125
7.2	今後の研究課題	127
第 7 章	参考文献	129

第1章 序論

1.1 研究の背景と目的

1920年代アメリカに端を発するモータリゼーションは今や全世界的に広まり、我々の生活を自動車交通から切り離すことはほぼ不可能な状態となっている。我が国では1960年代にモータリゼーションの波が到来し、1963年に日本初の高速道路が栗東－尼崎間に開通して以降、高規格幹線道路網整備は進み、2008年現在、その総延長は9,341km¹⁾を数えるに至る。しかし、高まる交通需要に対して十分な容量を持つ道路網を整備するには至らず、都市内高速道路では慢性的な交通渋滞が解決される兆しは見られない。都市間高速道路でも2001年のETC導入に伴い、料金所に起因する交通渋滞は漸次減少しつつある²⁾ものの、サグやトンネルなど単路部道路幾何構造由来のボトルネックで発生する自然渋滞は解消されていない。交通渋滞の発生はTraffic Breakdownと言われるように、一度渋滞が発生すると旅行速度と共に捌け交通量が著しく低下する。そのため、渋滞の発生は旅行時間を増加させるのみならず、大気汚染などの環境負荷やエネルギー消費量をも増大させるため、持続可能な社会を構築するためにはその解決が必要不可欠といえよう。一方、交通渋滞の解消を目的とした新規道路建設、すなわち道路ネットワークの容量拡大策はその効果自体が疑問視される他、経済的、世論的見地からもほぼ実現不可能に近い。そのため、交通流解析に基づいて交通渋滞発生メカニズムを把握し、その知見を基に道路運用・交通管理などソフト的な渋滞対策を講じる必要に迫られている。

ここで交通流解析の歴史を紐解くと、Wardrop³⁾による待ち時間を最小化する信号周期算定モデル(1952)や、Pipes⁴⁾による車両追従モデル(1953)が交通流解析、交通流理論研究の始まりであるとされている⁵⁾。それ以来構築されてきた数多くの交通流モデル・交通流理論の中でも最も画期的な交通流モデルの一つとして、Lighthill and Whitham⁶⁾、及びRichards⁷⁾によって提案されたKinematic Wave Theoryが挙げられる。Kinematic Wave Theoryは交通流を圧縮性流体に近似、単位時間あたりの交通量－密度関係(Fundamental Diagram)に凹関数を仮定することで、交通流状態の時空間的な変遷を記述するモデルである。この理論上、各道路断面は単位時間あたりに通過可能な最大の交通量である交通容量を有する。この場合、ある道路区間内で最も交通容量の低い道路断面をボトルネックとし、その交通容量を超過する流入需要が生じた場合にのみ渋滞が発生するとされ、この概念は実際の道路設計、交通管理などで広く用いられている。

しかし、実現象上では必ずしも一定の流入交通量を超過した時点でTraffic Breakdownが発生するのではなく、渋滞発生時交通量は道路設計上定められた可能交通容量より低く、大きくばらつくことが確認されている⁸⁾。これは、道路設計の基礎理論上、交通流を均一化して扱った点に誤謬があった。現実には多様な車両が混在し、車両性能、運転手の技量、旅行目的によって各車両の走行挙動は大きく異なる。すなわち、交通流は一台一台が独立

な意思を持つ運動体の集合として構成され、交通流観測を通して取得される情報は母集団から抽出された一つの標本に過ぎない。結果、観測される交通現象、交通流データは確率的なばらつきを持つこととなる。そのため、より精緻な道路運用、交通管理方策を講じるためには、交通流の持つ確率的性質を明らかにし、それを踏まえた上で渋滞発生メカニズムを解明する必要がある。

渋滞発生メカニズムについての理解は 1980 年代以降、交通観測技術、情報処理技術の発展に伴い、大量かつ緻密な車両挙動データの取得、分析が可能となったことをきっかけに大きく躍進した。Koshi *et al.*⁹⁾は複数地点に設置された車両感知器、及びビデオカメラによって得られた交通流データより、交通量-密度曲線は $0 \leq K \leq K_J$ (K : 交通密度, K_J : 限界密度) で定義される連続な凹関数ではなく、臨界密度付近で不連続な“Reversed Lambda”型となることを示している。また、越¹⁰⁾はサグやトンネルをボトルネックとする渋滞発生メカニズムとして「車群がサグの先の上り勾配あるいはトンネルの入り口にさしかかると、追越車線の車群の中に減速波が発生して、後方に増幅伝播し、車群が大きい場合には後尾車はついに追越車線上で停止あるいは徐行するに至る」との仮説を提案した。

この 2 つの知見を受け、1990 年代以降、車両単体の挙動を記述する追従モデル¹¹⁾¹²⁾¹³⁾や CA モデル¹⁴⁾¹⁵⁾¹⁶⁾を用いて交通量-密度関係の不連続性を解き明かす研究や、一台一台の車両を分子に見立て、Traffic Breakdown 現象を熱力学上の概念である相転移現象に擬えて求解する研究¹⁷⁾が数多くなされてきた。しかし、これらの研究はボトルネックが存在しない一様な道路構造・交通条件を仮定して構築されており、実現象との乖離が指摘される¹⁸⁾。他、交通流に内在する確率的性質を把握するには至っていない。特に、車両一台一台の挙動を制御するこれらのモデルが種々の交通現象を再現可能か否かは、モデルに対して外生的に与えるパラメータセットに大きく依存することも明らかとなっている¹⁹⁾。さらに、車両挙動特性の多様性の観点から、追従モデルのパラメータは個々の車両のみならず、走行状態、道路条件によって異なることが指摘されている²⁰⁾。

以上を勘案すると、交通流解析を行う上で交通流全体を巨視的に捉える手法、そして車両一台一台の挙動を記述する微視的な手法共に、交通流の確率的性質を捉え、道路運用・交通管理を行うには限界があると言える。

一方、越は渋滞発生メカニズムについての仮説の中で「車群」について言及している。車群とは“A group of vehicles traveling together as a group, either voluntarily or involuntarily because of signal control, geometrics, or other factors”と定義される²¹⁾交通現象である。高速道路上で車群が形成される要因は、先の定義で挙げられているようにサグやトンネル入り口部など減速を強いられる道路構造的要因の他に、各車両の希望走行速度、追越し、車線変更を含む追従挙動のばらつきにあると考えられる。すなわち、車群とは道路構造を与件とし、車両挙動特性の多様性を反映して現出する局所的な混雑状態であり、渋滞が発生するための必要条件であると言える。このことより、車群形成の要因となる車両挙動の確率

的特性，及び車群形成メカニズムを把握し，さらに車群がボトルネックを通過する際の減速波の発生，伝播状況を確率的に捉えることができれば，渋滞現象の確率的特性の把握が可能になると考えられる．

そこで本研究では，車群単位で交通流状態を記述する新しい交通流モデルである，「車群交通流モデル」を提案，構築する．車群交通流モデルでは個々の車両走行挙動の差異に起因して車群が形成されるとの視座に立つ一方，車群内を走行する車両には均一の走行挙動を仮定する．これにより，マクロ交通流モデルでは表現できなかった交通現象の多様性を考慮しつつ，現象を簡略化することでミクロ交通流モデルにおけるパラメータ依存の問題点を克服することを狙う．具体的には，車群が形成される要因となる交通流指標を特定し，車群形成メカニズムを明らかとする．さらに，車群がボトルネックに流入する際の減速波発生・伝播過程を把握，モデル化することで，渋滞発生時交通量が確率的に変動する現象を解明することを本研究の目的とする．

1.2 論文の構成

本論文の流れを図 1.1 にまとめる．また，論文の構成，内容は以下の通りである．

第 1 章 序論

第 1 章では本研究の背景と目的を述べると共に，論文の構成と各章の具体的な内容を説明する．

第 2 章 交通流解析と交通流理論の系譜

第 2 章では，1950 年代より展開されてきた交通流解析の知見と，それに伴って構築されてきた交通流理論の系譜を整理，俯瞰し，既往研究に対する本研究の位置づけ，及び新規性を明確化する．具体的には，これまでに提案されてきたマクロ交通流モデル，ミクロ交通流モデル，及び交通流の統計的性質を記述する交通流静的モデルについて整理し，その限界を指摘する．さらに，近年判明されてきた高速道路単路部ボトルネック現象についての既往研究を整理し，本提案モデルの方向性を明確化する．

第 3 章 連続する車両の走行速度相関に基づく車群判定手法

第 3 章では，本研究の解析対象である車群を定義し，実交通流データから車群を判定する手法を決定する．

第 4 章 車群形成モデルによる希望走行速度分布と車群台数分布の推定

第 4 章では，交通流の多様性を表す指標として希望走行速度分布に着目し，高速道路片側 1 車線区間での車群形成過程を希望走行速度分布の関係で記述する車群形成モデルを構

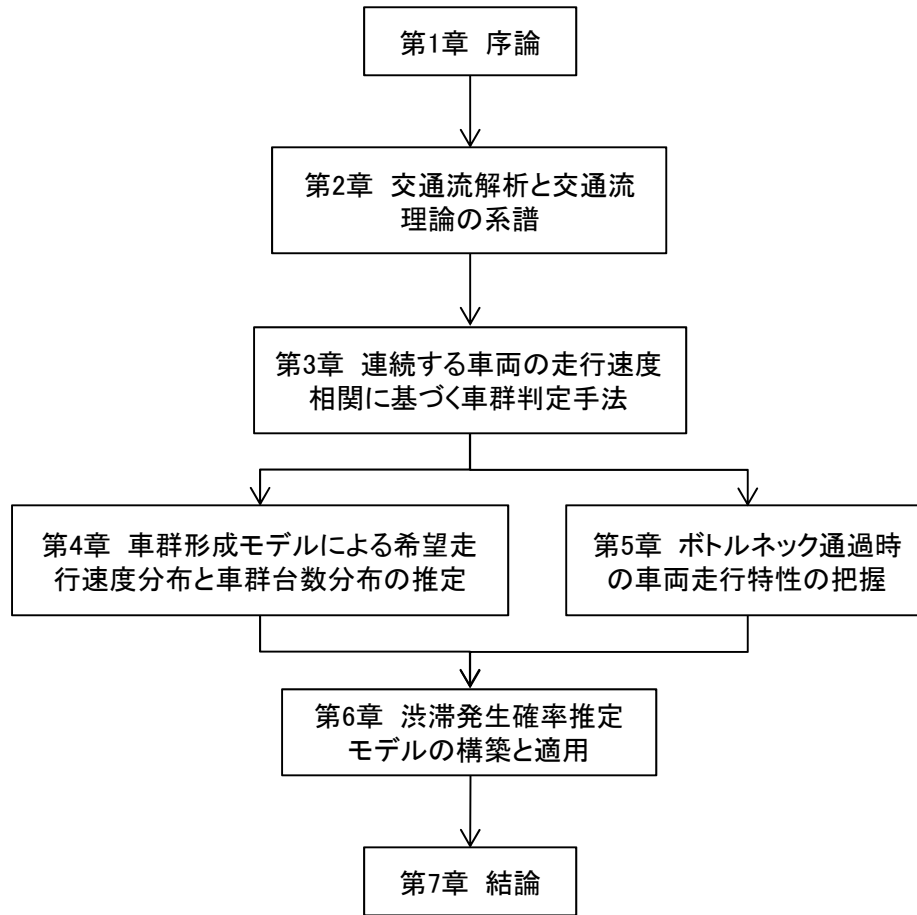


図 1.1 本論文の構成

築する．続いて，構築した車群形成モデルを用いて，車群の先頭車両速度ならびに車群台数の観測値から希望走行速度分布を推定する手法，及び推定された希望走行速度分布から車群台数分布を推定する手法を構築する．最後に，構築した車群台数分布推定手法，及び希望走行速度分布推定手法を実データに適用し，その妥当性についての検証を行う．

第 5 章 ボトルネック通過時の車両走行特性の把握

第 5 章では，東北自動車道下り線のサグを原因とするボトルネック区間に設置された車両感知器による交通流パルスデータに基づいて車群を抽出し，車群がボトルネックから流出する際の車両走行特性を把握し，車群を原因として渋滞が発生するメカニズムをモデル化するための基礎的な知見を得る．

第 6 章 渋滞発生確率推定モデルの構築と適用

第 6 章では，前章で得た知見に基づき，車群がボトルネックを通過する際の走行速度遷移過程を車群先頭車両速度ベクトルと走行速度遷移確率行列に基づくマルコフ連鎖モデルを用いて表現する．さらに，同モデルを第 4 章で構築した車群形成モデルと組み合わせ，

区間終端がボトルネックとなっている高速道路単路部片側 1 車線区間を対象に，希望走行速度分布，区間長を所与として，ボトルネックへの流入交通流率に対する渋滞発生確率を推定するモデルを構築する．また，同モデルを適用し，渋滞発生確率を抑止する施策について考察を行う．

第 7 章 結論

第 7 章では本論文の成果をまとめ，結論を述べると共に，今後の研究課題を整理する．

第 1 章 参考文献

- 1) <http://www.zenkousoku.com/seibi/index.html>, 高速道路整備ネットワーク 全国高速道路建設協議会 HP.
- 2) 谷野知伸 : ETC 利用率増加に伴う交通の変化について～東名高速道路東京本線料金所の例～, 交通工学第 41 巻増刊号, pp.46-50, 2006.
- 3) Wardrop, G.W.: Some theoretical aspect of road traffic research, Road Paper 36, Institute of Civil Engineers, 1952.
- 4) Pipes, L.A.: An operational analysis of traffic dynamics, Journal of Applied Physics, Vol.24, pp.274-281, 1953.
- 5) 佐佐木綱 : 交通流理論, 技術書院, 1965.
- 6) Lighthill, M.J. and G.B.Whitham: On kinematic waves II. A theory of traffic flow on long crowded roads, The Proceedings of the Royal Society, LONDON, series A 229(1178), pp313-345, 1955.
- 7) Richards, P.I.: Shock waves on the highway, Operation Research Vol.4, pp.42-51, 1956.
- 8) 岡村秀樹, 渡辺修治, 泉正之 ; 高速道路単路部の交通容量に関する調査研究 (下), 高速道路と自動車, Vol.44, No.3, pp.30-40, 2001.
- 9) Koshi, M., M. Iwasaki and I. Ohkura: Some findings and an overview on vehicular flow characteristics, Proceedings of the Eighth International Symposium on Transportation and Traffic Theory (Eds. V. Hurdle, E. Hauer and G. Stuart), University of Toronto Press, Toronto, Canada, pp. 403-451, 1983.
- 10) 越正毅 : 高速道路のボトルネック容量, 土木学会論文集 第 371 号/IV-5, pp.1-7, 1986.
- 11) Bando, M., K. Hasebe, A. Nakayama, A. Shibata and Y. Sugiyama: Dynamical model of traffic congestion and numerical simulation, Physics Review E51, pp.1035-1042, 1995.
- 12) Sugiyama, Y.: Dynamical model of congestion of freeway traffic and its structural stability, Traffic and Granular Flow (Eds. D.E. Wolf, M. Schreckenberg and A. Bachem), World Scientific, pp.137-149, 1996.
- 13) Sugiyama, Y. and H. Yamada: Simple and exactly solvable model for queue dynamics, Physics Review E 55, pp.7749-7752, 1997.
- 14) Nagel, K. and M. Schreckenberg: A cellular automaton model for freeway traffic, Journal of Physics I France 2, pp.2221-2229, 1992.
- 15) Fukui, M. and Y. Ishibashi: Evolution of traffic jam in traffic flow model, Journal of the Physical Society of Japan, Vol.62, No.11, pp.3841-3844, 1993.
- 16) Nishinari, K. M. Fukui and A. Schadschneider: A stochastic cellular automaton model for traffic flow with multiple metastable states, Journal of Physics A, Vol.37, pp.3101-3110,

2004.

- 17) Jost, D. and K. Nagel: Probabilistic traffic flow breakdown in stochastic car-following models, Traffic and Granular Flow '03 (Eds. Serge P. Hoogendoorn, Stefan Luding, Piet H. L. Bovy, Michael Schreckenberg and Dietrich E. Wolf), pp.87-103, 2005.
- 18) 大口敬：高速道路単路部渋滞発生解析—追従挙動モデルの整理と今後の展望—，土木学会論文集 No.660/IV-49， pp.39-51， 2000.
- 19) 邢 健，越正毅：高速道路のサグにおける渋滞現象と車両追従挙動の研究，土木学会論文集 No.506/IV-26,pp.45-55， 1995.
- 20) Hong, D., N. Uno, F. Kurauchi and M. Imada: Empirical analysis of drivers' car-following heterogeneity based on video image data, Proceedings of the 12th International Conference of Hong Kong Society for Transportation Studies (HKSTS), pp.401-410, 2007.
- 21) National Research Council: Highway Capacity Manual 2000 (CD-ROM), Transportation Research Board Special Report 209, TRB, Washington D.C., 2000.

第2章 交通流解析と交通流理論の系譜

2.1 概説

1950年代以降、高まる自動車交通需要の効率的な管理手法の策定を目的に、交通流特性を解析し、理論体系化するアプローチが多くとられてきた。交通流は多様な特性を持つ車両の集合として構成されているため、交通現象も確率的な性質を帯びる。この多様性こそが交通流解析を複雑なものとする一因となっている。これまでに提案されている交通流モデルは、交通流への仮定の違いによって大きく以下の3つに分類できる。

- (1) 単位時間あたりの断面通過車両台数や単位距離に存在する車両台数など、交通流特性を表現する集計的指標を用い、巨視的な視点から交通流の挙動を表現するモデル（マクロ交通流モデル）
- (2) 前方車両への追従挙動など個々の車両の走行挙動特性をモデル化し、微視的な視点から交通流の挙動を記述するモデル（ミクロ交通流モデル）
- (3) 各車両の車頭時間や走行速度などの走行挙動特性を記述する指標の統計的性質を表現するモデル（交通流静的モデル）

本章では、既存の交通流モデルを上記のマクロ交通流モデル、ミクロ交通流モデル、交通流静的モデルに分類し、各モデルの概要をまとめると共にその限界を指摘する。その上で、高速道路単路部ボトルネック現象に関する既往の知見について整理し、本論文で提案する車群交通流モデルの方向性、及び既往研究に対する位置づけを明確化する。

2.2 マクロ交通流モデル

マクロ交通流モデルは交通流を構成要素である車両単位で捉えるのではなく、単位時間あたりの断面通過車両台数、単位距離内に存在する車両台数といった集計された指標で表現し、巨視的な視点から交通流を捉えるものである。

Lighthill and Whitam¹⁾は単路部交通流を対象に、単位距離あたりの存在台数を表す指標として「交通密度」を定義、さらに、

- (a) 道路上の各断面において交通量は密度の関数として表される
- (b) 臨界密度で交通量は最大値を取り、限界密度で交通量は0となる

と仮定し、時空間的な交通量－密度状態の変遷を記述するキネマティックウェーブ理論を構築した。具体的には、交通密度の不連続面がショックウェーブとして移動する速度 u を、

$$u = \frac{\Delta q}{\Delta k} \quad (2.1)$$

と表現した。ただし、 Δq 、 Δk は、密度の不連続面における交通量、及び密度の変化量を表す。

一方、それと同時期に、Richards²⁾は交通流に関して、

(a) 車両挙動に関する分布はすべて連続な確率密度関数で記述可能である

(b) 平均走行速度は交通密度に対して単調減少する関数として表される

との仮定の下、交通密度の不連続面が伝播する速度 U を式(2.2)にて表現するモデルを提案した。

$$d_1(V_1 - U) = d_2(V_2 - U) \quad (2.2)$$

ただし、 d_1 , V_1 は密度の不連続面上流の交通密度と速度を、 d_2 , V_2 は密度の不連続面下流の交通密度と速度をそれぞれ表す。

両モデルは、交通量 Q [veh/h], 交通密度 K [veh/km], 区間平均速度 V [km/h]の間に、

$$Q = KV \quad (2.3)$$

の関係を導入することで一致することから、一般に Lighthill-Whitam-Richards の頭文字を取って LWR モデルと言われる。

この理論は交通流の交通量－密度関係を定めることで交通流状態の変遷を記述可能であり汎用性が高く、実現現象を的確に表現することができる。そのため、これまでも信号交差点の右折レーン長の算定³⁾や低速度で走行する車両が混入することによる交通流への影響分析⁴⁾など道路運用・交通管理上広く用いられてきた。また、LWR モデルを拡張したモデルも多く、車線変更が可能な多車線区間への適用⁵⁾⁶⁾⁷⁾⁸⁾や挙動特性の異なる複数の車種が混在する状況下⁹⁾¹⁰⁾¹¹⁾での解析などが行われている。

しかし、LWR モデルは個々の車両を均質化して扱い、さらに、交通量－密度－速度の交通流指標の間にそれぞれ連続な関係があることを仮定している。そのため、以下の問題点が指摘される。

- 1) 実観測により得られる交通量－密度関係は臨界密度付近で不連続な変化をすること¹²⁾が知られており、実現現象と乖離する。
- 2) 車両挙動特性の多様性を考慮できないため、交通容量は確定的な値として定義される。この場合、ある定められた交通容量以下の流入需要では一切渋滞は発生しないが、1台でも容量を超過する流入需要が生じると渋滞が発生するとの仮定が置かれている。しかし、実現現象では渋滞発生時交通量は確率的にばらつくことが確認¹³⁾されており、実現現象と乖離する。
- 3) 車両の加減速度に関する制約が考慮されていないため、実現現象では生起し得ないような走行挙動を前提とする可能性がある。
- 4) 渋滞流時の stop and go 状態を記述することができない。

以上の問題点を考慮した上で、Kerner は Three-Phase Traffic Theory を提案している¹⁴⁾。LWR モデルでは交通流状態は大きく自由流と渋滞流の2つの状態に分類されるのに対し、同理論では、交通流は Free flow, Synchronized flow と Wide moving jam の三段階に分類されるとする。Free flow は LWR モデルにおける自由流状態に対応し、Synchronized flow と Wide moving jam が渋滞流に対応する。Synchronized flow はボトルネック直上流に固定して

観測される高密度状態を表し、一方、Wide moving jam は交通流が限界密度に近くほぼ停止した状態が上流側に伝播する状況を表す。この3種類の状態を仮定することで、Free flow から Synchronized flow に転移する確率、及び Synchronized flow と Wide moving jam の関係性を分析し、よりの確に時空間での交通流状態の変遷を捉えようと試みるのが Three-Phase Traffic Theory である。しかし、同理論では Free flow から Synchronized flow に転移する確率を交通量の関数として扱うのみであり、転移する状況についての詳細な記述は見られない。

本研究では車両挙動特性の差異によって確率的に車群が形成されるとの視座の下、局所的な混雑状態である車群内での車両挙動特性を把握することにより、形成される車群の大きさと Traffic Breakdown の発生する確率の関係を記述するモデルを構築する。さらに、車群形成を流入交通流率との関係でモデル化することにより、流入交通流率を入力として Traffic Breakdown の発生確率を推定する手法を構築する。

2.3 ミクロ交通流モデル

ミクロ交通流モデルは個々の車両一台一台の挙動を記述することで、交通状況の時空間的な動的特性の把握を目的に構築された。特に追従挙動モデルから交通量－密度－平均速度のマクロ交通流指標の関係を導出する研究は追従挙動が提案された初期段階から組み込まれている¹⁵⁾。近年では臨界密度付近で交通量－密度関係が不連続変化する現象を熱力学上の相転移現象に見立て、個々の車両を分子にアナロジーした車両追従挙動のモデル化など¹⁶⁾¹⁷⁾¹⁸⁾が行われている。さらに、前方車両だけでなく複数台前方の車両の挙動に対しても反応し、追従を行うとの視座の下構築された追従挙動モデルも散見される¹⁹⁾²⁰⁾。

追従モデルを記述するパラメータには、前方車両への反応時間、反応強度など直接観測では取得できないパラメータが用いられる。そのため、的確なパラメータを推定するためには、ビデオ観測などから時空間的に広がる車両一台一台の走行軌跡データを取得し、実現象を最も的確に再現し得るパラメータセットを見つけることとなる。

これにより、特定の観測結果を再現するパラメータを設定することは可能である²¹⁾。しかし、追従挙動特性は各車両、道路の幾何構造、走行環境によって異なり、追従モデルのパラメータセットも状況によって異なることが指摘されるなど²²⁾、交通流を構成する各車両のパラメータの一般的特性は明らかとされていない²³⁾。さらに、サグの影響を考慮した追従挙動モデルも提案され²⁴⁾、その再現性の検証もなされている²⁵⁾が、ボトルネックとして顕在化するサグの特性を見いだすには至っていない。また、追従モデルの評価を車両走行軌跡の再現性で行うのではなく、交通量－密度関係の再現性より行うこともなされている²⁶⁾が、この場合、必ずしも現実の交通流との整合性が担保されるとは限らず、パラメータ特性についての考察は必要不可欠であると考えられる。

一方、追従挙動などの車両挙動を簡略化して扱うことのできるセルオートマトンモデル

(CA モデル) を用いた渋滞現象解析も近年盛んに行われている。CA モデルは道路をセルで分割し、車両がセル間を移動するルールを規定することで交通流を再現する²⁷⁾。モデルの枠組みが極めて単純であり、車両運動のルールを確率的に規定することで、交通現象の確率的性質を把握することが可能である²⁸⁾。しかし、この場合も現象を再現できるか否かは車両運動ルールや直接観測では得られないパラメータ値に大きく依存するため、如何に実現象に整合する適切なルールやパラメータセットを導入するかが、今後の課題となる。

2.4 交通流静的モデル

交通流は、一台一台が独立した意思を持つ車両の集合体として構成される。そのため、個々の車両の走行挙動特性はそれぞれ異なり、交通流として観測される車頭時間や走行速度、車群台数などの交通流指標はある分布形を持つこととなる。このような交通流の持つ確率的特性を把握し、道路のサービス水準に影響を与える車群形成状況や旅行時間遅れの予測を試みる研究はこれまでに数多くなされている。

例えば Newell²⁹⁾は、各車両の走行速度はある希望走行速度分布に従ってランダムに決定され、前方車両に追付いた車両はすべて前方車両を追越すと仮定した。その上で、前方車両の追越しに要する時間を当該車両の希望走行速度と前方車両の走行速度の関係で算出する手法を構築、交通量レベルの低い上下分離された多車線高速道路単路区間を前提に、車両が走行車線のある一定区間内を走行する時の平均走行速度の分布を導出している。

Tanner³⁰⁾や Miller³¹⁾は、上下分離されていない高速道路片側 1 車線区間で低速度走行車両を先頭に形成される車群形成状況を待ち行列理論に基づいてモデル化し、車群台数分布を推定するモデルを構築している。

Cowan³²⁾は、追越しの禁止された区間長 L の片側 1 車線区間を対象とし、各車両が対象区間内で前方車両に追い付くことなく、自由走行を維持したまま区間を通過するのに要する時間の分布を希望所用時間分布と定義した。その上で、定常状態にある交通流を対象に、実際に区間を走行するのに要した時間の分布と希望所要時間分布の関係で、車群台数分布や密度－交通流率の関係を推定する手法を構築している。

上述のモデルは、いずれも交通流の基本的性質を表す分布の存在を仮定し、その分布から観測可能な交通流状態を記述する指標の分布を算出するものである。しかし、多くのモデルでは解析的な求解を可能とするため、交通流についての定常性や各車両挙動の独立性を仮定することが多く、例えば交通量が極めて低い状況など限定的な交通条件の下でしか適用できない、との問題点が指摘される。

Daganzo³³⁾は、上下分離のされていない片側 1 車線道路を対象に希望走行速度の差異によって車群が形成されると仮定した上で、交通量レベルの低い交通流に対しては待ち行列理論を援用し、低速度走行車両を先頭に形成される車群台数分布を表現するモデルを構築した。さらに、交通量レベルが高くなると車群同士が連結する現象を考慮したモデルに拡張

することで、交通量レベルによることなく車群台数分布や遅れ時間分布を推定する手法を構築した。しかし、この手法では2種類の希望走行速度のみを考慮しており、モデルの一般化が課題となっている。

また、自由流だけではなく、渋滞流状態にある交通流も対象として実速度分布³⁴⁾、車頭時間分布³⁵⁾、及び車群台数分布³⁶⁾を推定する研究もなされている。しかし、自由流状態と渋滞流状態とではそれぞれ独立にモデルが構築されていたため、自由流から渋滞流への遷移過程の記述はされていない。

本研究では、交通流に対して希望走行速度分布の存在を仮定、その差異によって車群が形成されるとの視座の下、車群形成過程をモデル化する。さらに、形成された車群がボトルネックを通過する際の車両挙動を実観測データに基づいて把握し、自由流から渋滞流へと遷移する過程を記述するモデルを構築する。

2.5 高速道路単路部におけるボトルネック現象

高速道路単路部のサグやトンネル入り口部がボトルネックとなって渋滞が発生することが明らかとなったのは1980年代のことである。越³⁷⁾はサグやトンネルが交通容量上のボトルネックとなることを実データに基づいて紹介し、その渋滞発生メカニズムとして「車群がサグの先の上り勾配あるいはトンネルの入り口にさしかかると、追越車線の車群の中に減速波が発生して、後方に増幅伝播し、車群が大きい場合には後尾車はついに追越車線上で停止あるいは徐行するに至る」との推論を立てている。

さらに、単路部ボトルネックにおける渋滞現象と車群の関係性を指摘した研究として、ボトルネック上流側への付加車線の設置が渋滞対策効果を生むことが報告されており³⁸⁾³⁹⁾⁴⁰⁾、このメカニズムとして車群の存在が指摘されている。すなわち、付加車線が設置されていない場合、渋滞発生直前の交通量レベルの高い状態では内側車線に車線利用率が著しく偏る傾向があり、その結果、密で大きな車群が形成され、車群中で発生する微少な速度攪乱が減速波となり上流へ伝搬して渋滞へ至る。対して、ボトルネック上流側に付加車線を設置することでボトルネックへ流入する交通流の車線利用率の偏りを是正、車群の拡散化がなされ、渋滞を軽減させる効果があると考えられている。また、この知見は高速道路多車線区間のみならず、片側1車線区間でもボトルネック直前の付加車線設置が渋滞を軽減する効果があることが報告されている。吉川ら⁴¹⁾は高速道路暫定2車線区間ボトルネックから1.2km上流側に設置された付加車線延長を525mから1,745mに延伸したことによって年間渋滞発生回数が大幅に減少した事例を紹介し、その原因として付加車線の延伸による車群分散効果を挙げている。

このように、多くの既往研究でボトルネックに流入する車群と渋滞発生との関係が指摘されており、車群と渋滞現象の直接的な関係を分析する研究も行われている。大口⁴²⁾は自由流時の車群構成台数と渋滞発生時の車群構成台数を比較した結果、渋滞発生時には高密度で

かつ大きい車群が形成される傾向にあることを確認しているが、必ずしも大きい車群が渋滞を発生させる訳ではないことを指摘している。小宮ら⁴³⁾はサグ近傍に設置したビデオ画像を基に渋滞の端緒となった車群を特定、渋滞発生時の車両挙動を解析した結果、車群先頭車両の特異な走行挙動を原因として渋滞が発生したことを確認している。

以上、単路部ボトルネックにおける車群と渋滞現象の関係をまとめると、

- (1) 局所的に高密な交通流状態である大きい車群がボトルネックに流入することで渋滞発生のかきかけとなり得ること
- (2) 渋滞発生のかきかけとなる車群の条件は明らかではなく、同じような車群であっても渋滞が発生する時と発生しない時があること
- (3) 車群中のある車両の特異な挙動が減速波の発生、伝播を誘発する可能性があることが指摘できる。

そこで本研究では、車群がボトルネックに流入するときの車両挙動特性を都市間高速道路サグ部近傍に設置された複数のループ式車両感知器によるパルスデータを用いて分析する。その結果に基づき、車群内で減速波が発生し、上流側に伝播する過程を確率的にモデル化することで、車群をかきかけとして渋滞が発生するメカニズムの確率的な理解を試みる。

2.6 既存の研究に対する本研究の位置づけ

上述のように、マクロ交通流モデルは交通流の交通量－密度関係を定めることで交通流状態の変遷を記述可能であり汎用性が高く、実現象を的確に表現することができるという長所を有する一方で、交通流の多様性を考慮できないなどの欠点も持つ。また、ミクロ交通流モデルは個々の車両挙動を表現することで、サグ部などの微細な道路構造の差異による車両挙動の変化などをモデル化することができるが、モデルが実現象を再現するか否かはパラメータセットに大きく依存するという欠点が挙げられる。一方、交通流静的モデルに関しては、交通流特性を記述する指標の統計的性質を自由流・渋滞流を問わず表現することのできるモデルが構築されている。しかし、同モデルでは定常状態にある交通流状態を記述するのに留まり、**Traffic Breakdown** の発生など時々刻々と交通状況が変化するような現象を表現することは不可能である。

以上を踏まえ、本研究では交通流を車群単位で扱う。車群とは、先頭である自由走行車両とそれに続く追従を強いられた車両の連なりであり、局所的に高密度な交通流状態である。

車群形成状況を鑑みると、高速道路上で車群が形成される要因は、サグやトンネル入り口部など減速を強いる道路構造、及び希望走行速度や追い越し、車線変更を含む各車両走行挙動のばらつきにあると考えられる。

そこで、本研究では与件として与えられる道路構造、及び車両毎の走行挙動特性の差異

に起因して確率的に車群が形成されるとの視座に立つ．その一方で，車群に属して走行する車両の挙動特性は均質化して扱うことにより，マクロ交通流モデルでは表現できなかった交通流の確率的性質を考慮しつつ，現象を簡略化することでミクロ交通流モデルにおけるパラメータ依存の問題点を克服することを狙う．

具体的には，高速道路多車線区間への適用の前段階として，高速道路片側 1 車線区間に着目し，ボトルネックに流入する車群台数分布を希望走行速度分布と流入交通流率の関係で推定するモデルを構築する．さらに，実観測データに基づき，ボトルネックに流入する車群中で減速波が発生，上流側へ延伸し渋滞へ至る過程を確率的に表現するモデルを構築し，渋滞発生時交通量が確率的に変動する現象を説明する．

第 2 章 参考文献

- 1) Light hill, M.J. and G.B. Whitham: On Kinematic Waves II. A theory of traffic flow on long crowded roads, The Proceedings of the Royal Society, LONDON, series A 229(1178), pp.313-345, 1955.
- 2) Richards, P.I.: Shock waves on the highway, Operation Research Vol.4, pp.42-51, 1956.
- 3) Rorbech, J.: Determining the length of the approach lanes required at signal-controlled intersections on through highways, Transportation Research Vol.2, pp.283-291, 1968.
- 4) Edie L. C.: Flow theories. In Traffic Science (Edited by Gazis D. C.), Wiley, New York, pp.62-69, 1974.
- 5) Mujal, P.K. and L.A. Pipes: Propagation of on-ramp density perturbations on unidirectional two- and three-lane freeways, Transportation Research Part B 5(4), pp.241-255, 1971.
- 6) Mujal, P.K., Y. Hsu and R.L. Lawrence: Analysis and validation of lane-drop effects on multi-lane freeways, Transportation Research Part B 5 (4), pp.257-266, 1971.
- 7) Michalopoulos, P.G., D.E. Beskos and Y. Yamauchi: Multilane traffic dynamics: some macroscopic considerations, Transportation Research part B 18(4-5), pp.377-395, 1984.
- 8) Laval, J.A. and C.F. Daganzo: Lane-changing in traffic streams, Transportation Research Part B 40, pp.251-264, 2006.
- 9) Powell, M.: A model to represent motorcycle behavior at signalized intersections incorporating an amended first order macroscopic approach, Transportation Research Part A 34, pp.497-514, 2000.
- 10) Wong, G.C.K. and A.C. Wong: A multi-class traffic flow model-an extension of LWR model with heterogeneous drivers, Transportation Research Part A 36, pp. 827-841, 2002.
- 11) Shiomi, Y., T. Yoshii and R. Kitamura: Traffic flow at the bottleneck on divided two-lane expressway, Proceedings of the 5th International Symposium on Highway Capacity and Quality of Service, TRB, Vol.2, pp.359-367, 2006.
- 12) Koshi, M., M. Iwasaki and I. Ohkura: Some findings and an overview on vehicular flow characteristics, Proceedings of the Eighth International Symposium on Transportation and Traffic Theory (Eds. V. Hurdle, E. Hauer and G. Stuart), University of Toronto Press, Toronto, Canada, pp. 403-451, 1983.
- 13) 岡村秀樹, 渡辺修治, 泉正之: 高速道路単路部の交通容量に関する調査研究 (下), 高速道路と自動車, Vol.44, No.3, pp.30-40, 2001.
- 14) Kerner, B.S.: The Physics of traffic, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2004.
- 15) Edie, L.C.: Car-following and steady-state theory for non-congested traffic, Operations Research, Vol.9, No.1, pp.66-75, 1961.

- 16) Bando, M., K. Hasebe, A. Nakayama, A. Shibata and Y. Sugiyama: Dynamical model of traffic congestion and numerical simulation, *Physics Review E* 51, pp.1035-1042, 1995.
- 17) Sugiyama, Y.: Dynamical model of congestion of freeway traffic and its structural stability, *Traffic and Granular Flow* (Eds. D.E. Wolf, M. Schreckenberg and A. Bachem), World Scientific, pp.137-149, 1996.
- 18) Sugiyama, Y. and H. Yamada: Simple and exactly solvable model for queue dynamics, *Physics Review E* 55, pp.7749-7752, 1997.
- 19) Lenz, H., C.K. Wagner and R. Sollacher: Multi-anticipative car-following model, *The European Physical Journal B* (7), pp.331-335, 1999.
- 20) Hoogendoorn, S.P., S. Ossen and M. Schreuder: Properties of a microscopic heterogeneous multi-anticipative traffic flow model, *Proceedings of 17th Transportation and Traffic Theory* (Eds. R.W. Allsop, M.G.H. Bell and B.G. Heydecker), pp.583-605, 2007.
- 21) 邢 健, 越正毅: 高速道路のサグにおける渋滞現象と車両追従挙動の研究, 土木学会論文集, No.506/IV-26, pp.45-55, 1995.
- 22) 大口敬: 高速道路単路部渋滞発生解析—追従挙動モデルの整理と今後の展望—, 土木学会論文集, No.660/IV-49, pp.39-51, 2000.
- 23) Hong, D., N. Uno, F. Kurauchi and M. Imada: Empirical analysis of drivers' car-following heterogeneity based on video image data, *Proceedings of the 12th International Conference of Hong Kong Society for Transportation Studies (HKSTS)*, pp.401-410, 2007.
- 24) Ozaki, H.: Assistance of drivers to mitigate highway capacity problem, *Proceedings of the 2nd WC on ITS*, pp.1727-1731, 1995.
- 25) 大口敬, 小沼良一: 勾配影響を考慮した追従挙動モデルの比較分析, 第 34 回土木計画学研究発表会・講演集 CD-ROM, No.171, 2006.
- 26) 金井政宏, 西成活裕, 時弘哲治: 交通流の確率モデルについて, 応用力学研究所研究集会報告, No.16ME-S1, 2004.
- 27) Nagel, K. and M. Schreckenberg: A cellular automaton model for freeway traffic, *Journal of Physics I France* 2, pp.2221-2229, 1992.
- 28) Jost, D. and K. Nagel: Probabilistic traffic flow breakdown in stochastic car following models, *Traffic and Granular Flow (TGF)'03*, pp.87-103, 2003.
- 29) Newell, G.F.: Mathematical models for freely-flowing highway traffic, *Journal of the Operations Research Society of America*, Vol. 3, No. 2, pp. 176-186, 1955.
- 30) Tanner, J.C.: A derivation of the Borel distribution, *Biometrika*, Vol.48, No. 1/2, pp. 222-224, 1961.
- 31) Miller, A.J.: A queuing model for road traffic flow, *Journal of the Royal Statistical Society*, B23, No. 1, pp. 64-90, 1961.

- 32) Cowan, R.J.: A road with no overtaking, Australian Journal of Statistics, Vol.13, No.2, pp. 94-116, 1971.
- 33) Daganzo, C.F.: Probabilistic structure of two-lane road traffic, Transportation Research Vol.9, pp.339-346, 1975.
- 34) 田村洋一, 樗木武: 自由車・追従車構成に着目した車頭時間分布モデルに関する研究, 土木学会論文報告集第 336 号, pp.159-168, 1983.
- 35) 田村洋一, 樗木武, 三野定: 交通流の基本速度分布モデルおよび実際速度分布モデルの構築に関する研究, 土木学会論文集, 第 377 号/IV-6, pp.127-135, 1987.
- 36) Tamura, Y. and T. Chisyaki: Modeling and study of speed and bunch distributions considering fluctuations of traffic flow, Proceedings of the 10th International Symposium on Transportation and Traffic Theory, pp.99-119, 1987.
- 37) 越正毅: 高速道路のボトルネック容量, 土木学会論文集 第 371 号/IV-5, pp.1-7, 1986.
- 38) 栗原光二, 羽山章, 安積淳一: ボトルネック対策としての付加車線の効用, 高速道路と自動車 第 42 巻 第 7 号, pp.29-36, 1999.
- 39) 大口敬, 桑原雅夫, 赤羽弘和, 渡邊亨: ボトルネック上流における車線利用率の矯正効果と付加車線設置形態, 交通工学, Vo.36, No.1, pp.59-69, 2001.
- 40) 渡辺亨, 逢坂光博, 平井章一: 高速道路における渋滞対策としての単路部付加車線のあり方, 交通工学, Vol.38 増刊号, pp.41-44, 2003.
- 41) 吉川良一, 長浜和実, シンジャン, 吉井稔雄, 北村隆一: 高速道路暫定 2 車線区間におけるボトルネック交通容量に関する考察, 土木計画学研究・論文集, Vol.22, NO.4, pp.839-846, 2005.
- 42) 大口敬, 片倉正彦, 鹿田成則: 高速道路単路部をボトルネックとする渋滞発生特性に関する実証的研究, 高速道路と自動車, 第 44 巻, 第 12 号, pp.27-34, 2001.
- 43) 小宮粹史, 赤羽弘和, 竹平誠治, 草壁郁郎: 都市高速道路におけるサグ渋滞発生要因の微視的分析, 第 35 回土木計画学研究発表会・講演集, No.320, 2007.

第3章 連続する車両の走行速度相関に基づく車群判定手法

3.1 概説

本研究では交通流を車群単位で扱い、その形成過程や走行特性を解析、モデル化し高速道路単路部ボトルネックでの渋滞現象の把握を試みる。車群は一般に、”A group of vehicles traveling together as a group, either voluntarily or involuntarily because of signal control, geometrics, or other factors”¹⁾と定義される交通現象である¹⁾。高速道路単路部ボトルネックでの渋滞現象解析を行うに当たり、本研究では車群を「自由走行する先頭車両と、それに続く追従走行車両によって構成される車両の連なり」と定義する。以下では、自由走行車両と追従走行車両の判定基準について実データを踏まえて検討する。

3.2 既往研究での追従走行車両と自由走行車両の判別手法

車両の追従状態とは、換言すると「先行車の影響を受け、その希望速度以下の速度で走行することを強制されている」²⁾状態と言える。そのため、仮に各車両の希望走行速度を得ることができれば、観測によって得られる走行速度と希望走行速度を比較することにより追従状態を判別することができる。しかし、現実上、各車両の希望走行速度を得ることは不可能であり、「個々の運転者の挙動特性から追従走行状態と単独走行状態を区別する方法、理論的根拠は未だに見つけられていない」とされている³⁾。そのため、多くの場合は便宜上 3.0 秒～5.0 秒程度の車頭時間を指標として区別されている⁴⁾。

追従走行と自由走行の車頭時間閾値を決定する手法はこれまでも多く提案されている。Buckley⁵⁾、田村ら²⁾、及び Hoogendoorn *et al.*⁶⁾は、自由走行車両に由来する車頭時間分布と追従走行車両に由来する車頭時間分布が独立して存在し、その合成された分布が交通流観測により得られる車頭時間分布になると仮定した。その上で、観測車頭時間分布から自由走行車両の車頭時間分布と追従走行車両の車頭時間分布を分離する手法を構築、推定された追従走行車両の車頭時間分布の最大値を持って追従走行と自由走行の閾値を決定している。しかし、この場合、各車頭時間分布は観測時の交通量水準に大きく依存すると考えられるが、その点についての考察は行われていない。また、実際に走行する車両は自由走行状態、追従走行状態にある車両のみならず、前方車両を視認して自由走行から追従走行へと減速中の車両も多く存在すると考えられ、考慮する必要がある。

一方、Highway Capacity Manual⁷⁾では、連続する2車両の車頭時間と相対速度の関係から追従走行と自由走行の閾値となる車頭時間を判別する手法が提案されている。具体的には、車頭時間の増大に伴い2車両間の相対速度の分散も増大するが、ある車頭時間以降は相対速度の分散が一定値に収束する、との知見より、相対速度分散の変曲点に対応する車頭時間を追従走行と自由走行の閾値としている。Pahl *et al.*⁸⁾は上述の車頭時間－相対速度分散の関係を踏まえ、相対速度の分散が一定値に収束している場合は2車両の走行速度が独立

に決定されている，との視座の下，その独立性が成立し得なくなる車頭時間を追従走行と自由走行の閾値としている．また田村ら²⁾は，車頭時間の増大と共に相対速度分散が増大するのは，前方車両の速度分布と後続車両の速度分布の間に相関関係が存在し，車頭時間の増大と共に走行速度の相関係数が減少していくためであることを指摘している．

以上を踏まえ，本研究では，前方車両走行速度と後方車両走行速度の間に生じる相関関係に着目し，実観測データに基づいて車頭時間水準毎に連続する2車両の走行速度の相関係数の関係を算出，追従走行と自由走行の車頭時間閾値について考察を行う．

3.3 データの概要

追従走行と自由走行の車頭時間の閾値を決定するのに当たり，本研究では高速道路片側2車線区間として東北自動車道下り線 93.2kp 地点で観測されたデータを，さらに高速道路片側1車線区間として東海北陸自動車道上り線 72.6kp 地点にて観測されたデータを用いる．以下では各観測データの概要を整理し，データ精度についての検証を行う．

3.3.1 東北自動車道下り線 93.2kp 地点

当該地点は鹿沼 IC の下流約 4.0km, 93.8kp 地点～94.4kp 地点を最底部とするサグの上流に位置する．対象区間の概略図を図 3.1 に示す．本分析では 93.2kp 地点の走行車線，並びに追越車線に設置された車両感知器で取得された交通流パルスデータを用いる．以下にデータの概要をまとめる．

- (1) データ種別：当該区間の渋滞現象解析を目的に特別に設置されたループ式車両感知器による交通流パルスデータ．
- (2) 観測日時：1994 年 12 月 26 日～1995 年 1 月 9 日，1995 年 4 月 22 日～5 月 7 日，1995 年 8 月 9 日～8 月 22 日の計 46 日間．
- (3) 取得データ：車両通過時刻（時分秒），車種（小型 or 大型），速度（0.1km/h 単位），車長（1.0m 単位），車頭間隔（1.0m 単位），車頭時間（0.1 秒単位）．
- (4) 観測時の天候：95 年 1 月 4 日，4 月 26 日，5 月 1 日，8 月 10 日，8 月 13 日，8 月 16 日，8 月 22 日のみ降雨を観測．
- (5) 備考：追越車線に設置された車両感知器では 95 年 4 月 22 日～4 月 27 日，95 年 8 月 9 日～8 月 11 日，走行車線に設置された車両感知器では 95 年 8 月 9 日～8 月 11 日にかけてデータが欠損していることを確認している（付録参照）．

分析に当たっては走行状況を同一にするために，降雨のない昼間時間帯に観測された非渋滞時のデータのみを用いる．ただし，12 月，1 月に観測されたデータに関しては 8:00～16:00 を，4 月，5 月，及び 8 月に観測されたデータに関しては 7:00～17:30 を昼時間帯とした．また，渋滞判定は山岡ら⁹⁾による簡易的な渋滞判定基準を採用し，走行速度 40km/h 未満の車両が 2 台連続で観測された時点で Traffic Breakdown が完遂，渋滞状態へと遷移するとみなし，それ以降の時間帯は分析対象外とした．

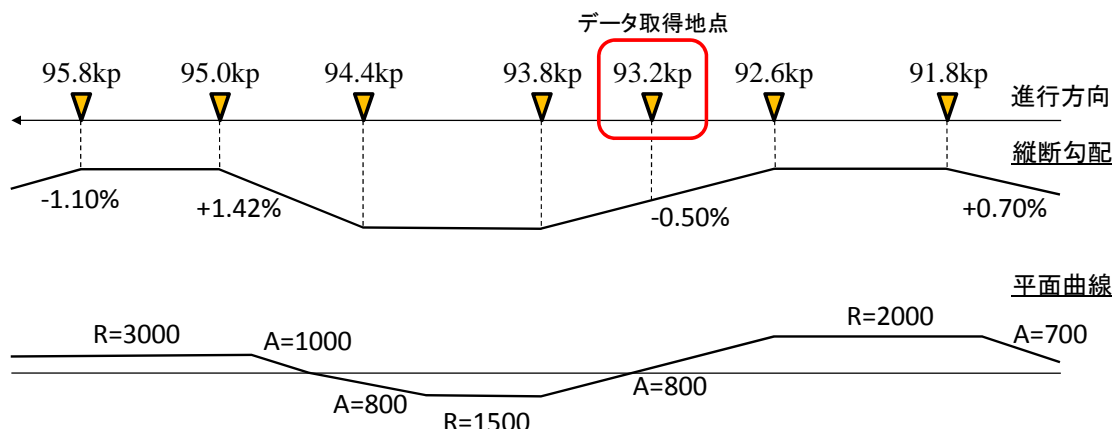


図 3.1 東北自動車道データ取得地点概略図

車両走行速度に関する車両感知器データの系統誤差を調べるため、走行車線・追越車線共に、連続する 2 車両の前方車両速度を x 軸、後方車両速度を y 軸に取り、散布図を描画した。走行車線の結果を図 3.2 に、追越車線の結果を図 3.3 に示す。

まず、走行車線での散布図に着目すると、1) $y=x$ 直線を中心に分布するプロット集合、2) $y=0$ 付近に分布するプロット集合、及び 3) $x=0$ 付近に分布するプロット集合に分類できることが確認できる。2)のプロット集合は前方車両速度に対し後方車両の速度が著しく低い状況を、3)のプロット集合は後方車両速度に対し前方車両速度が著しく低い状況を表す。これは 3 台の連続する車両の内、2 台目の車両の速度が何らかの理由で著しく低い値として感知されたものと考えられる。この場合、1 台目と 2 台目の走行速度として 2)が、2 台目と 3 台目の走行速度として 3)が観測されることとなる。本分析で用いたデータはすべて自由流状態で観測されたものであることを考慮すると、3 台の連続する車両の内 2 台目の車両の速度のみ著しく低い値が観測されるのは、急減速を強いられる突発事象が生じた状況か、感知器エラーに由来すると考えられる。本研究では定常的な交通流状態での渋滞現象解析を目的としているため、突発事象による観測データは解析対象外とする。そこで、以降の分析では、前方車両速度が 60[km/h]以上かつ後方車両速度が 50[km/h]未満の車両を感知した後、その直後の車両速度が 60[km/h]以上であった場合に、当該 3 台の車両の観測データはエラーデータと判断する。図 3.4 にエラーデータを除去した前方車両速度－後方車両速度関係を示す。これより、上述のプロット集合 2)、3)が除去されていることが確認できる。

次に、追越車線における前方車両速度－後方車両速度の関係に着目する。図 3.3 中の各プロットを大別すると、1) $y=x$ 直線を中心に分布するプロット集合、2) $x>y$ の領域に分布するプロット集合、3) $y>x$ の領域に分布するプロット集合に分類できる。さらに、プロット集合 3)は、a) $0<x<40$ かつ $100<y<150$ の領域に分布する集合、b) $0<x<40$ かつ $40<y<60$ の領域に分布する集合、c) $40<x$ かつ $80<y$ の領域に分布する集合に分類される。プロット集

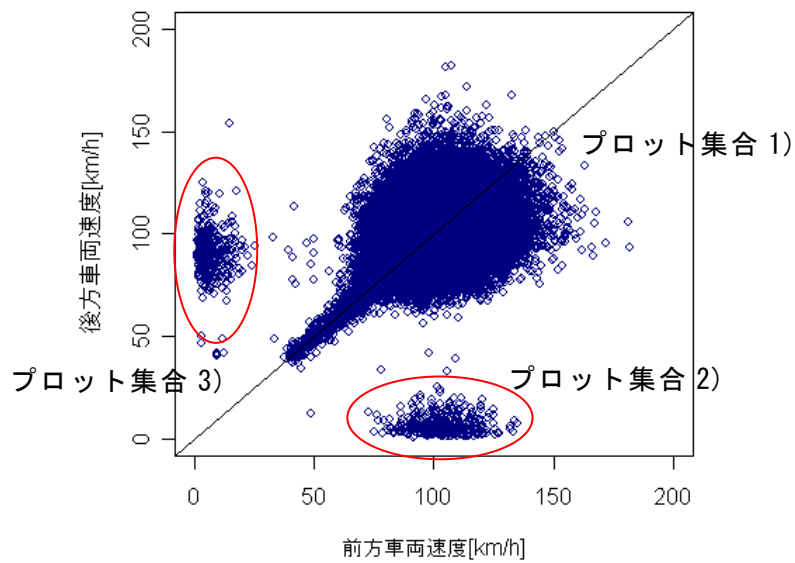


図 3.2 前方車両速度－後方車両速度散布図（走行車線）

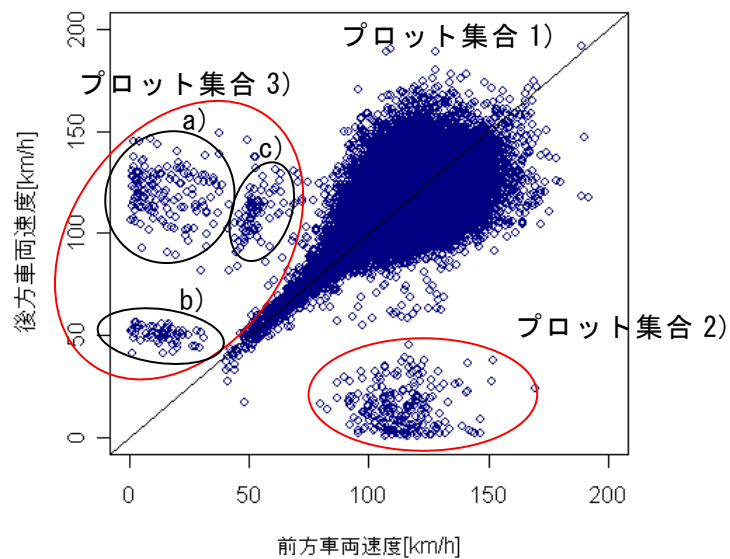


図 3.3 前方車両速度－後方車両速度散布図（追越車線）

合 2)とプロット集合 3-a)が観測される理由としては、走行車線と同様に 3 台の連続する車両の内 2 台目の車両の速度のみが、何らかの理由により極めて低く観測されたためであると考えられる．一方、プロット集合 3-b), 3-c)が観測されることについて、連続する 4 台の車両の内 2 台目の車両速度が著しく低下、続く 3 台目の車両で速度は回復されるものの完全には回復せず、4 台目の車両でほぼ 1 台目の車両速度と等しい速度にまで回復する、という状況にあると考えられる．この場合も、走行車線と同様に自由流状態で観測されたデータであることを考慮すると、2 台目の車両速度が著しく低下する理由として、急減速

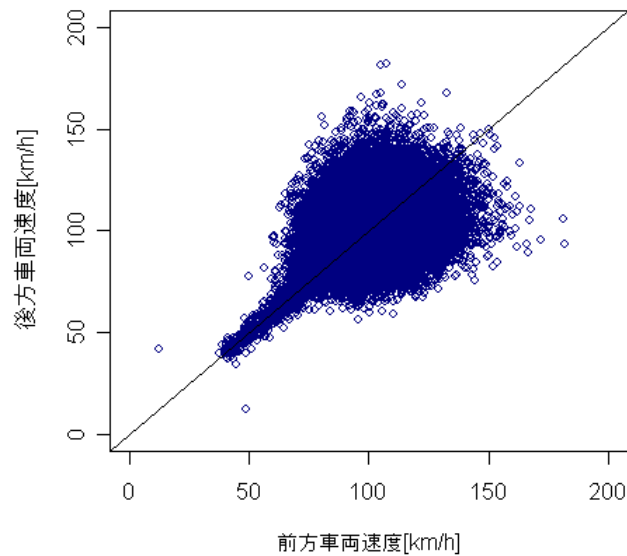


図 3.4 エラー除去後の前方車両速度－後方車両速度散布図（走行車線）

を強いられる突発事象の発生，もしくは，感知器エラーが挙げられる．そこで，突発事象や感知器エラーを除去するため，以下の状況が観測された場合，当該の連続する車両の観測データをエラーデータと判断する．

- (1) 前方車両速度が 60[km/h]以上かつ後方車両速度が 50[km/h]未満の車両を感知した後，その直後の車両速度が 60[km/h]であった場合
- (2) 前方車両速度が 60[km/h]以上かつ後方車両速度が 40[km/h]未満の車両を感知し，さらに続く 2 車両の速度が，40[km/h]以上 60[km/h]未満，80[km/h]以上と変動している場合

図 3.5 にエラーデータを除去した前方車両速度－後方車両速度関係を示す．これより，上述のプロット集合 2)，3)が除去されていることが確認できる．

3.3.2 東海北陸自動車道上り線 72.6kp 地点

当該地点は白鳥 IC の下流約 3.5km に位置し，付加車線設置区間に挟まれた延長約 2.1km の片側 1 車線区間の終端に位置する．対象区間の概略図を図 3.6 に示す．交通流データは 72.6kp 地点を撮影したビデオカメラより取得した．以下に取得したデータの概要をまとめる．

- (1) データ種別：デジタルビデオカメラによる画像データを用いる．ビデオ画面内に 32m 離れた 2 地点を特定し，その間の通過所要時間を計測することにより走行速度を，特定した 2 地点の内，上流地点の通過時刻に基づいて車頭時間を算定する．
- (2) 観測日時：2004 年 7 月 18 日（日）13:00-19:00，及び 19 日（月，祝）13:00-17:00.
- (3) 取得データ：車両通過時刻（時分秒），車種（小型 or 大型），速度（0.1km/h 単位），

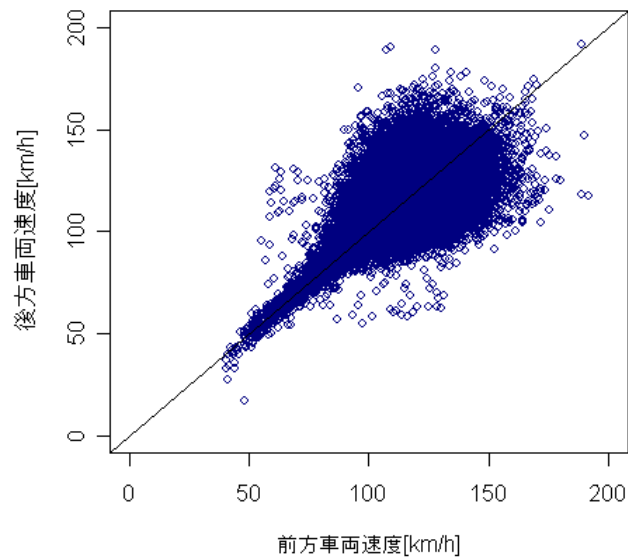


図 3.5 エラー除去後の前方車両速度－後方車両速度散布図（追越車線）

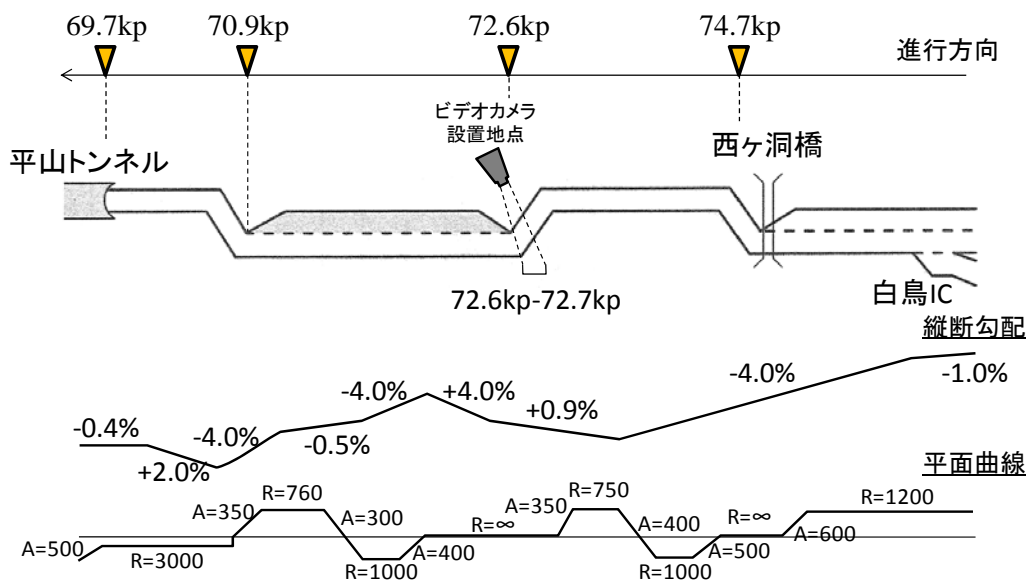


図 3.6 東海北陸自動車道データ取得地点概略図

車頭時間（0.1 秒単位）.

(4) 観測時の天候：両日共，観測時間中の降雨は観測されなかった.

(5) 備考:18日は16:52～17:25にかけてデータが欠損している. また, 19日の15:45-17:00にかけて約3km下流に位置する平山トンネルをボトルネックとして渋滞が発生しているが, 当該観測地点までは延伸していない（附録参照）.

観測データの系統誤差を確認するため，連続する2車両の前方車両速度を x 軸，後方車両速度を y 軸とした散布図を描画した. その結果を図3.7に示す. 図より，各観測値は $y=x$ 直線を中心に分布していることが確認できる. ただし，走行速度が80[km/h]より高い領域では，観測値が離散的に分布している. これは，走行速度の算出に当たりビデオ画像上に特定した2地点を通過するのに要する時間を基にしていることに起因する. つまり，デジタルビデオカメラで取得される画像は30フレーム/秒で記録されており，走行速度の高い車両については観測速度解像度が低くなるためである.

以上より，観測データに多少の系統誤差が存在するものの，以下では上述の取得されたデータを用いて分析を行う.

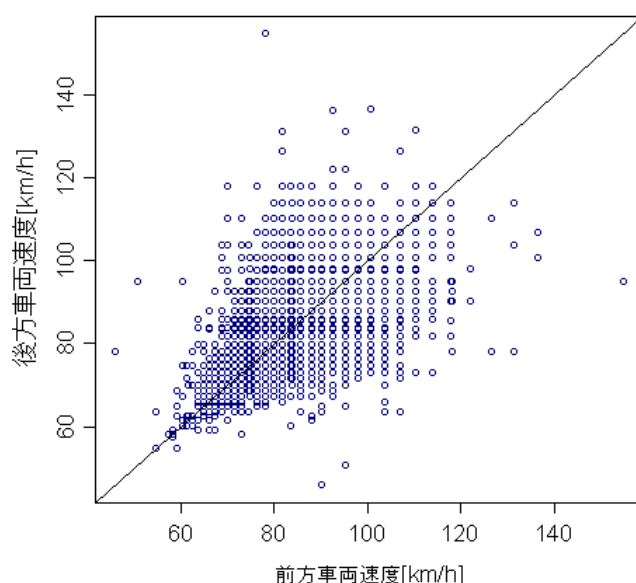


図 3.7 前方車両速度－後方車両速度散布図（東海北陸自動車道）

3.4 車頭時間と連続2車両の走行速度相関の関係

連続する2車両間の車頭時間が十分に小さい場合，ほぼすべての車両は前方車両に対して追従走行状態にあると考えられる. 追従時の走行挙動について，連続する2車両の車間距離と相対速度の関係はスパイラル曲線として表現されることが確認されている¹⁰⁾¹¹⁾. すなわち，追従状態にある車両の相対速度には多少のぶれは存在するものの，その値は小さ

く、2 車両の走行速度には強い相関が生じると考えられる。車頭時間が大きくなると追従状態にある車両の割合は減少する一方、前方車両を視認して自由走行から追従走行へと遷移するため減速状態にある車両の割合が増加する。結果、観測される相対速度の分散も大きくなり連続する車両の走行速度相関も低くなる。さらに車頭時間が大きくなると、ほぼすべての車両が前方車両に拘束されることなく走行し、その走行速度は前方車両速度とは独立に決定される状態になる。すなわち、連続する車両の走行速度相関はほぼ 0 になると考えられる。

以上を勘案すると、連続する 2 車両間の走行速度の相関は車頭時間に基づいて決定される関数として表される。そこで本節では、交通流観測によって得られる連続する 2 車両間の走行速度相関を車頭時間水準毎に算出、その関係について考察を行い、自由走行と追従走行の車頭時間閾値について検討する。

3.4.1 東北自動車道下り線 93.2kp 地点

車両感知器で得られた車両データから、車頭時間水準毎の相対速度の平均・標準偏差の関係を求めた。ただし、車頭時間は 0.5 秒間隔でレベルを設定し、0 秒以上 0.5 秒未満、0.5 秒以上 1.0 秒未満、…、14.5 秒以上 15.0 秒未満の 30 の水準を設けた。また、相対速度は後方車両走行速度から前方車両走行速度を引いた値として定義した。すなわち、相対速度が正值を取る場合は後方車両が前方車両に対して接近しつつある状況を、相対速度が負値を取る場合は前方車両に対して後方車両が遠ざかっていく状況を表す。その結果を表 3.1、及び図 3.8、図 3.9 にまとめる。また、表 3.1 には、帰無仮説「 H_0 : 相対速度の平均値は 0 である」の下、式(3.1)で算出される統計量 T の検定結果も合わせて示す。

$$T = \frac{\sqrt{n-1} \cdot \bar{X}}{\hat{\sigma}} \quad (3.1)$$

ただし、 n はサンプル数、 \bar{X} は相対速度の平均値、 $\hat{\sigma}$ は相対速度の標準偏差を表す。このとき、統計量 T は自由度 $n-1$ の t 分布に従う。

まず、車頭時間水準毎の相対速度平均値に着目すると、走行車線・追越車線共にほぼ 0 に近い値を取っているが、車頭時間が 2.0 秒以下では有意に負となり、車頭時間が 3.0 秒～4.0 秒程度で有意に正となっていることが確認できる。この理由は以下の通りである。

車両が前方車両に対して極めて近接して追従している場合、追突しないように走行速度を調整するため後方車両の速度は前方車両より小さくなる傾向を持つ。そのため、車頭時間が極めて小さい場合は相対速度の平均が負となる。一方で、車頭時間がある程度大きくなると前方車両に追い付く過程にあり、減速中の車両の割合が多くなると考えられる。そのため、車頭時間が 3.0 秒～4.0 秒程度の場合、相対速度の平均値が正となる。

次に、車頭時間水準毎の相対速度標準偏差に着目すると、相対速度の標準偏差は車頭時間の増大と共に増加し、車頭時間 4.0 秒あたりで変曲点を迎え、その後もゆるやかに増大し、車頭時間 9.0 秒を過ぎてほぼ一定値となることが分かる。すなわち、車頭時間と相対

速度の標準偏差の関係は、ばらつきはあるものの図 3.9 に示すような Piecewise Linear の関係にあると言える。

図中、線分 DE の状態では車頭時間が十分に大きいため、連続する 2 車両間の走行速度に相関がないことが考えられる。一方、点 D より車頭時間が小さくなるにつれ、相対速度の標準偏差は小さくなり、点 C の変曲点を迎えた後、標準偏差は急激に低下していく傾向にあるといえる。車頭時間が点 C から点 D のレベルの時は、自由走行する車両と前方車両を視認して自由走行状態から追従走行状態へと遷移するため減速状態にある車両が混在し、車頭時間が小さくなるにつれて減速状態にある車両の割合が増大するため、相対速度の分散は漸減すると考えられる。さらに点 C より車頭時間が小さくなると、自由走行状態にある車両はほぼ存在せず、減速状態にある車両と追従状態にある車両が混在する状態になる。そのため、点 C 以降は急激に相対速度分散が減少し、最終的に線分 AB の状態ではほぼすべての車両が追従状態にあり、連続する 2 車両の走行速度相関も高くなることが推察される。

表 3.1 車頭時間水準毎の相対速度平均・標準偏差
(東北自動車道下り線 93.2kp 地点)

車頭時間[sec]	走行車線				追越車線			
	サンプル数	平均[km/h]	標準偏差[km/h]	T	サンプル数	平均[km/h]	標準偏差[km/h]	T
0.0-0.5	-	-	-	-	-	-	-	-
0.5-1.0	4,442	0.032	5.295	0.398	12,333	-0.697	5.231	-14.798 **
1.0-1.5	18,989	-0.169	6.145	-3.786 **	22,218	-0.243	5.502	-6.572 **
1.5-2.0	25,322	-0.109	7.440	-2.334 *	15,312	0.010	6.778	0.186
2.0-2.5	22,699	-0.077	8.617	-1.345	9,358	0.026	8.492	0.295
2.5-3.0	18,823	-0.025	10.051	-0.337	6,322	0.255	9.844	2.060
3.0-3.5	15,007	0.029	10.762	0.335	4,644	0.450	10.954	2.797 *
3.5-4.0	12,212	0.074	11.693	0.701	3,678	0.206	11.802	1.057
4.0-4.5	10,179	0.316	12.596	2.529 *	3,046	0.729	12.659	3.179 **
4.5-5.0	8,486	0.235	12.965	1.666	2,515	0.162	13.151	0.616
5.0-5.5	7,100	0.039	13.511	0.244	2,128	0.444	13.419	1.526
5.5-6.0	6,127	-0.057	13.815	-0.322	1,938	0.238	13.412	0.780
6.0-6.5	5,216	0.323	14.320	1.629	1,731	0.153	13.838	0.461
6.5-7.0	4,351	0.081	14.655	0.364	1,456	0.445	14.214	1.194
7.0-7.5	3,848	0.431	14.934	1.789	1,312	0.391	14.854	0.954
7.5-8.0	3,186	0.298	14.988	1.122	1,151	-0.269	14.817	-0.616
8.0-8.5	2,781	-0.229	15.429	-0.781	1,084	0.197	15.108	0.428
8.5-9.0	2,406	-0.182	15.726	-0.567	900	0.836	15.062	1.664
9.0-9.5	2,039	-0.202	15.622	-0.584	857	0.087	15.271	0.166
9.5-10.0	1,709	0.513	15.941	1.329	811	0.086	14.863	0.165
10.0-10.5	1,491	-0.090	15.817	-0.219	757	0.830	15.065	1.515
10.5-11.0	1,312	0.651	15.858	1.486	740	0.411	14.811	0.755
11.0-11.5	1,216	-0.569	16.093	-1.233	651	-0.343	15.502	-0.564
11.5-12.0	998	-0.448	16.341	-0.866	590	0.346	15.135	0.554
12.0-12.5	858	0.221	16.433	0.394	529	-0.187	15.082	-0.285
12.5-13.0	784	-0.477	16.300	-0.819	446	-0.359	15.765	-0.480
13.0-13.5	631	-0.478	16.641	-0.721	430	0.197	16.279	0.251
13.5-14.0	607	-1.626	15.855	-2.524 *	454	0.046	15.364	0.063
14.0-14.5	509	0.468	16.685	0.632	427	-0.117	15.390	-0.156
14.5-15.0	443	1.287	16.455	1.644	343	0.840	16.282	0.954

* p=0.05, **p=0.01

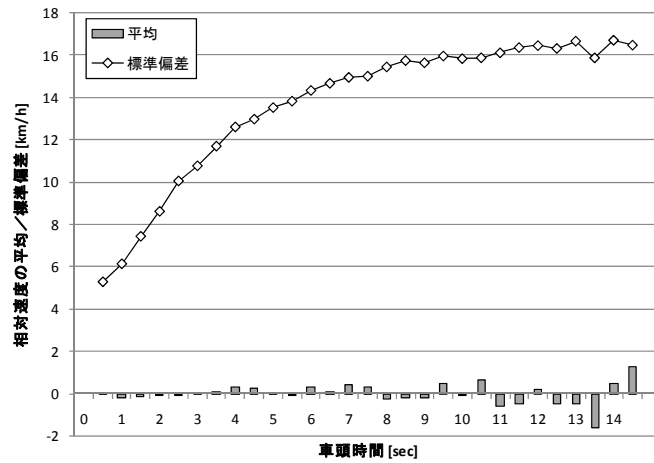


図 3.8 車頭時間水準毎の相対速度平均・標準偏差
(東北自動車道下り線 93.2kp 地点 走行車線)

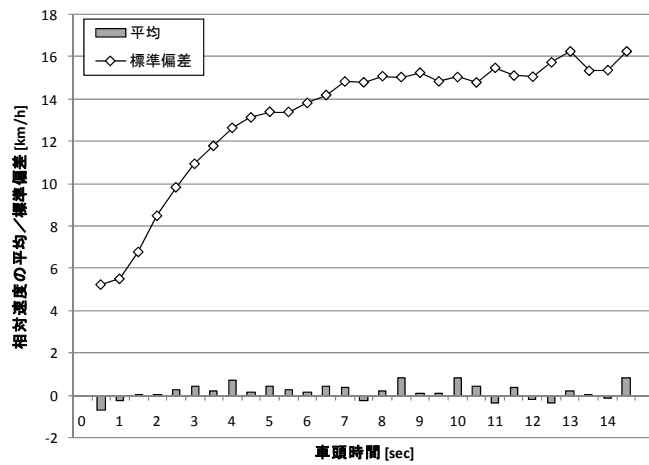


図 3.9 車頭時間水準毎の相対速度平均・標準偏差
(東北自動車道下り線 93.2kp 地点 追越車線)

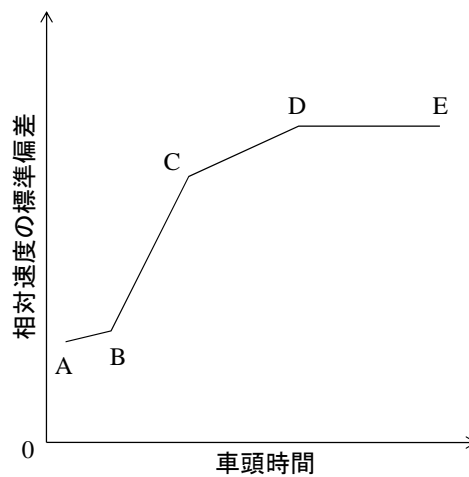


図 3.10 車頭時間と相対速度標準偏差の模式的関係

そこで、このことを確認するため、実観測データに基づき車頭時間水準毎に連続する 2 車両間の走行速度相関係数を算出した。車頭時間水準と走行速度相関係数の関係を図 3.11 に示す。また、車頭時間水準毎の前方車両速度－後方車両速度関係の散布図を、走行車線については図 3.12.1～図 3.12.10 に、追越車線については図 3.13.1～図 3.13.10 に示す。

図 3.11 より、車頭時間が小さいときは連続する 2 車両間の走行速度相関係数がほぼ 0.9 と高いのに対し、車頭時間が大きくなるに連れて走行速度相関は減少する傾向にあることが確認できる。また、走行車線では車頭時間約 6.0 秒から 8.0 秒、追越車線では車頭時間約 4.0 秒から 6.0 秒で変曲点を迎え、相関係数が一旦下げ止まることが分かる。さらに車頭時間が大きくなり走行車線で 8.5 秒以上、追越車線で 7.0 秒以上になると、相関係数は約 0.1～0.2 で一定値を取るようになる。

この結果を踏まえ、連続する 2 車両の走行速度相関は走行状態（追従走行状態、減速走行状態、自由走行状態）によって一意に決まると仮定すると、車頭時間水準に対する走行速度相関の関係、及び各走行状態の構成比率は模式的に図 3.14 のように表現できると推察される。すなわち、車頭時間が小さい点 A から点 B にかけてはすべての車両が追従走行状態にある。点 B 以降では追従走行状態にある車両の他、前方車両に対して追い付きつつある状態、すなわち減速走行状態の車両が徐々に増え、点 C に至る。さらに点 C' 以降では前方車両に対して全く影響を受けない自由走行車両の割合が増え、点 D 以降ではすべての車両が自由走行状態になる。

以上の推察に基づくと、図 3.14 中の点 C に対応する車頭時間を自由走行と追従走行の車頭時間閾値とするのが妥当であると考えられる。そこで本研究では、高速道路片側 2 車線区間の走行車線では車頭時間 5.5 秒未満の車両を追従走行車両、それ以上の車両を自由走行車両と定義する。また、追越車線では 4.0 秒未満の車両を追従走行車両、それ以上の車両を自由走行車両と定義する。

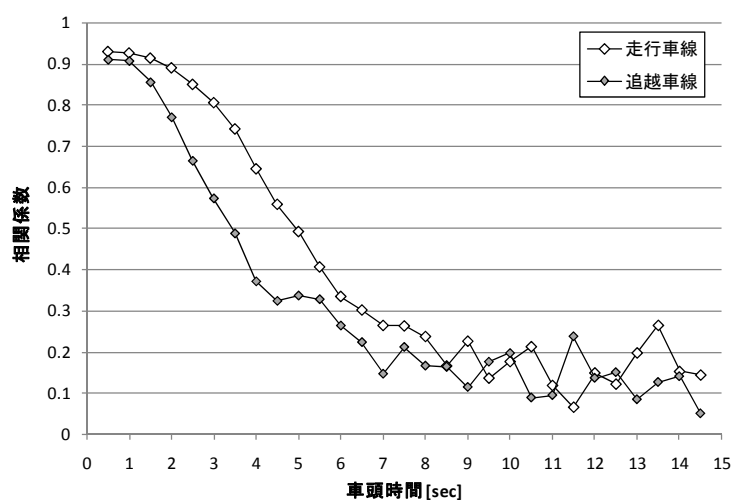


図 3.11 連続する 2 車両間の走行速度相関係数

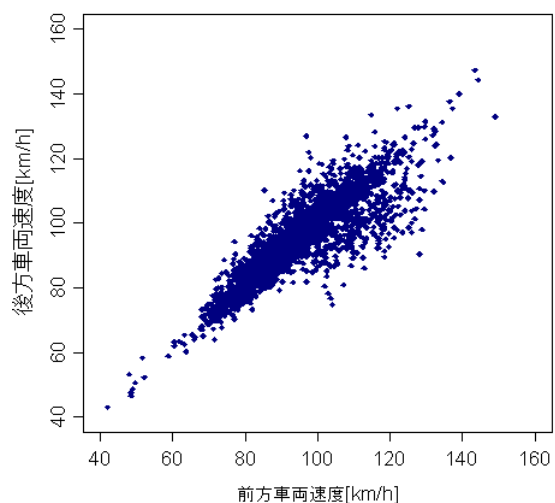


図 3.12.1 走行車線走行速度散布図
(車頭時間 0 秒以上 1 秒未満)

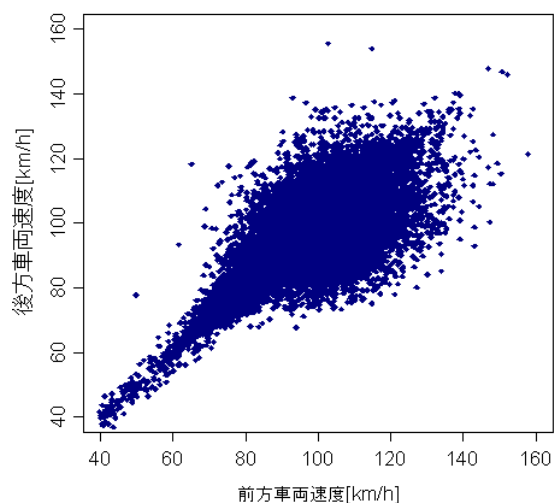


図 3.12.2 走行車線走行速度散布図
(車頭時間 1 秒以上 2 秒未満)

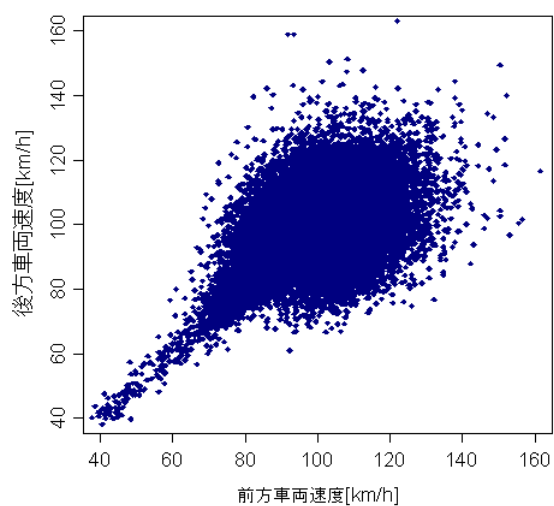


図 3.12.3 走行車線走行速度散布図
(車頭時間 2 秒以上 3 秒未満)

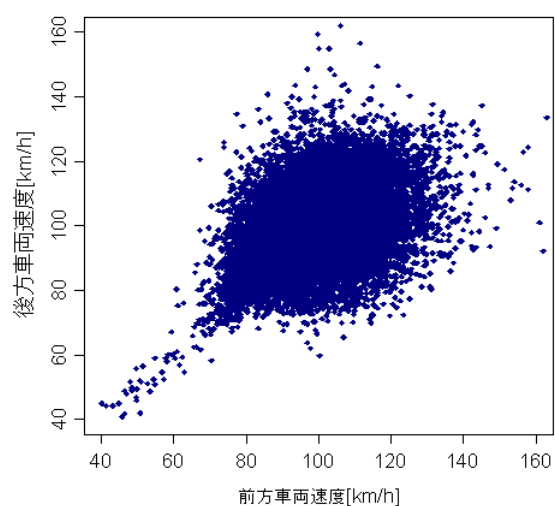


図 3.12.4 走行車線走行速度散布図
(車頭時間 3 秒以上 4 秒未満)

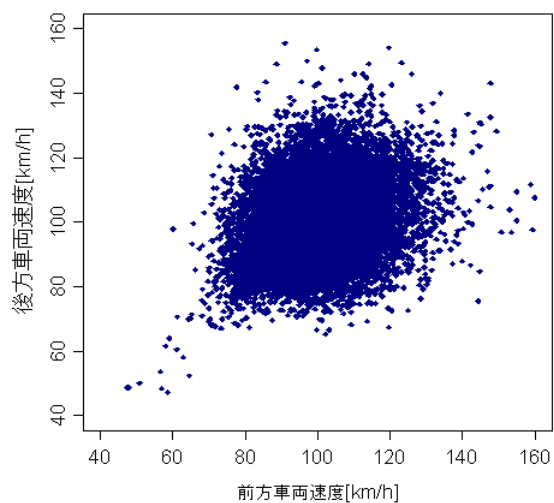


図 3.12.5 走行車線走行速度散布図
(車頭時間 4 秒以上 5 秒未満)

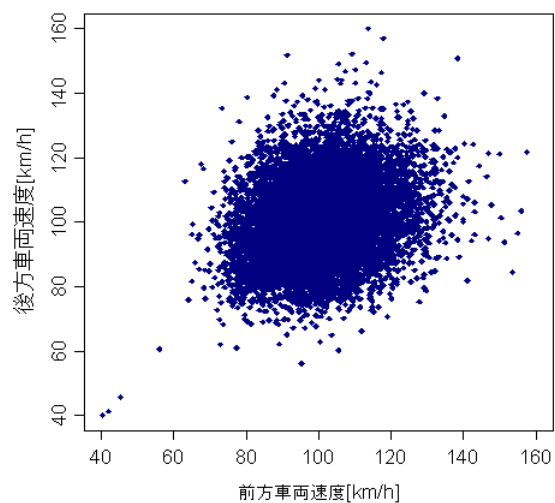


図 3.12.6 走行車線走行速度散布図
(車頭時間 5 秒以上 6 秒未満)

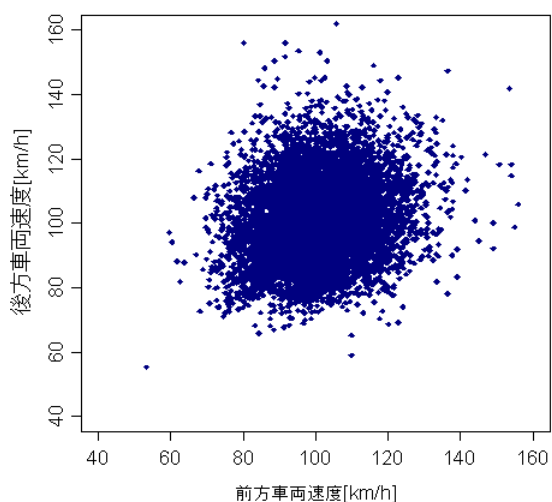


図 3.12.7 走行車線走行速度散布図
(車頭時間 6 秒以上 7 秒未満)

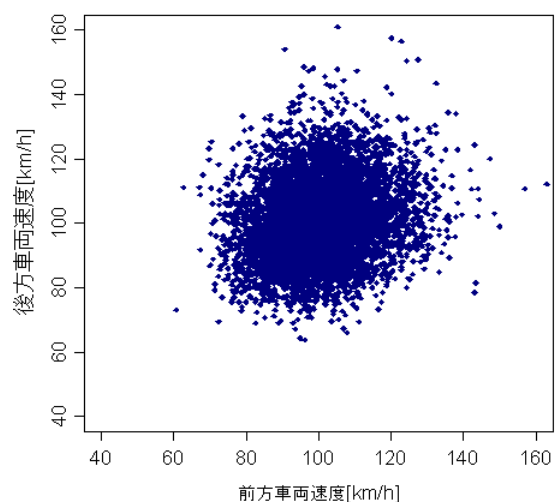


図 3.12.8 走行車線走行速度散布図
(車頭時間 7 秒以上 8 秒未満)

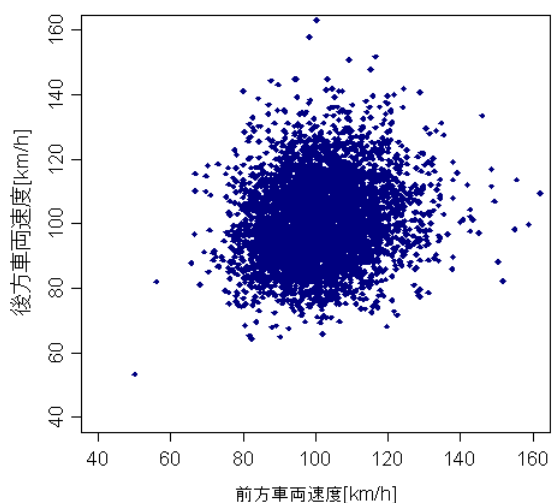


図 3.12.9 走行車線走行速度散布図
(車頭時間 8 秒以上 9 秒未満)

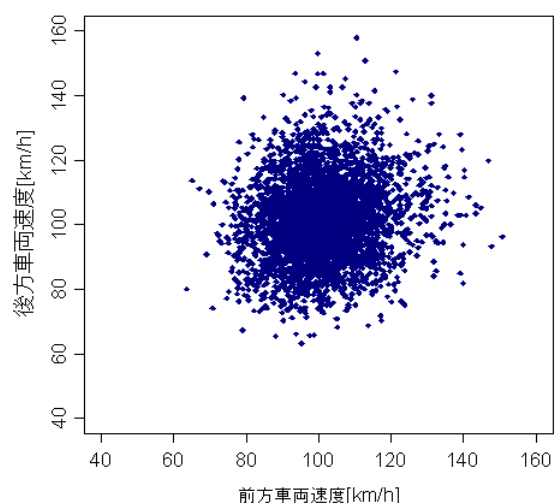


図 3.12.10 走行車線走行速度散布図
(車頭時間 9 秒以上 10 秒未満)

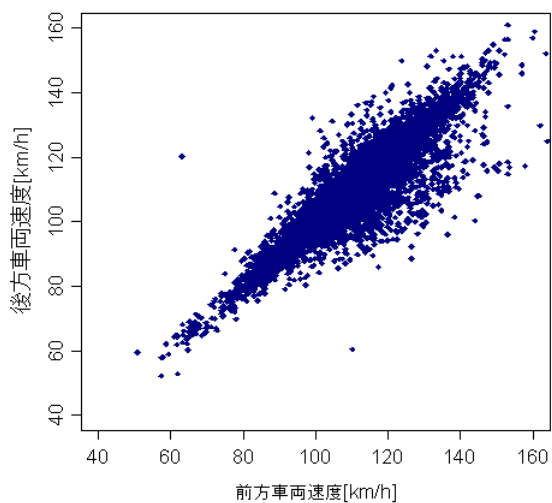


図 3.13.1 追越車線走行速度散布図
(車頭時間 0 秒以上 1 秒未満)

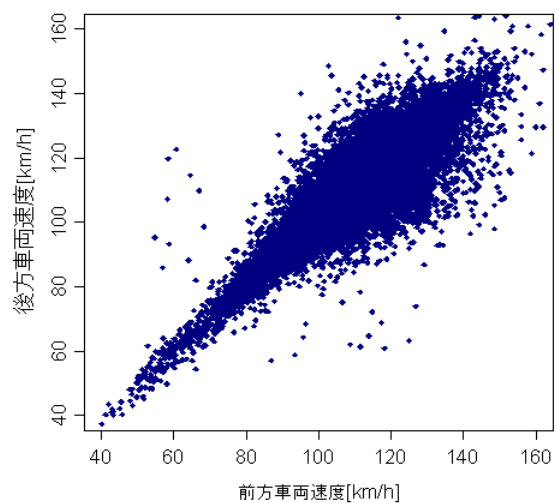


図 3.13.2 追越車線走行速度散布図
(車頭時間 1 秒以上 2 秒未満)

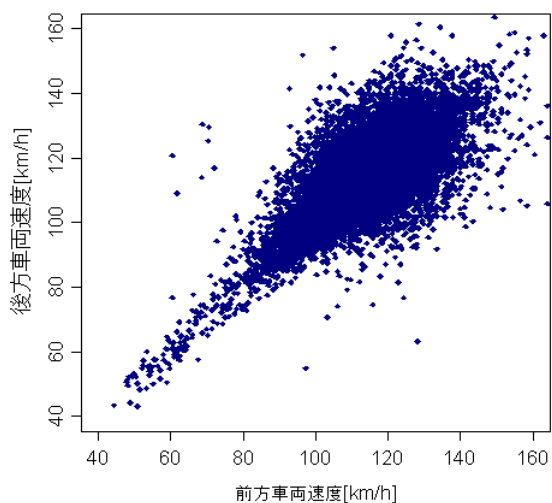


図 3.13.3 追越車線走行速度散布図
(車頭時間 2 秒以上 3 秒未満)

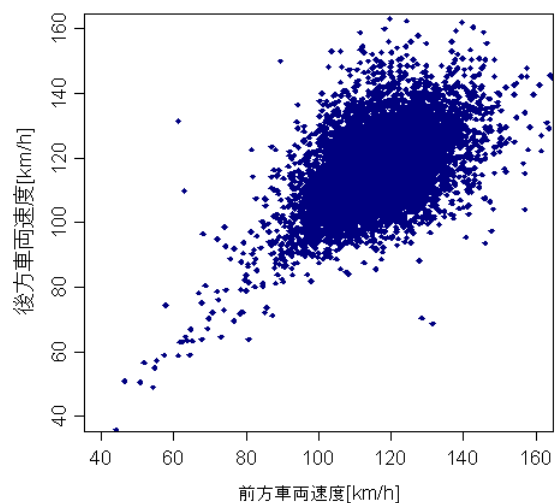


図 3.13.4 追越車線走行速度散布図
(車頭時間 3 秒以上 4 秒未満)

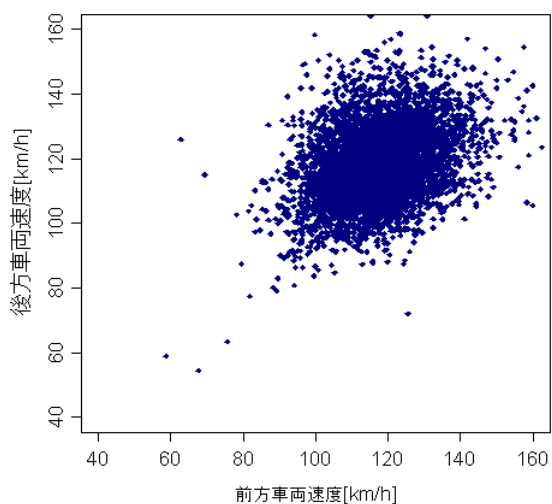


図 3.13.5 追越車線走行速度散布図
(車頭時間 4 秒以上 5 秒未満)

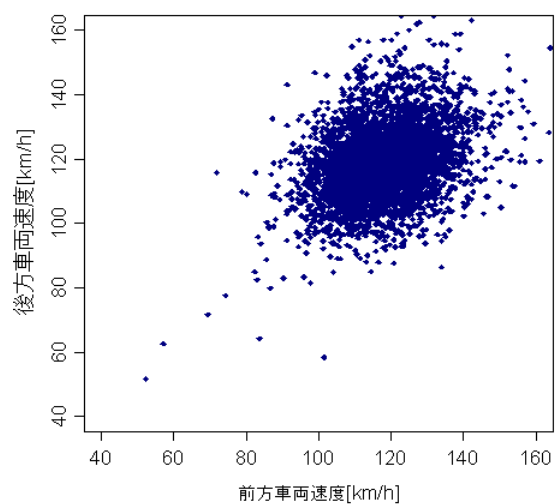


図 3.13.6 追越車線走行速度散布図
(車頭時間 5 秒以上 6 秒未満)

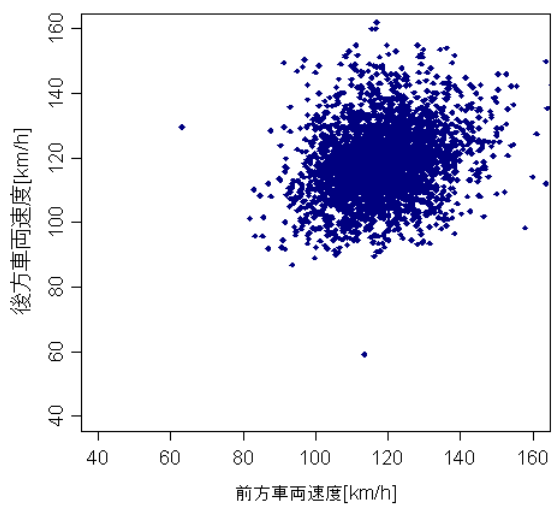


図 3.13.7 追越車線走行速度散布図
(車頭時間 6 秒以上 7 秒未満)

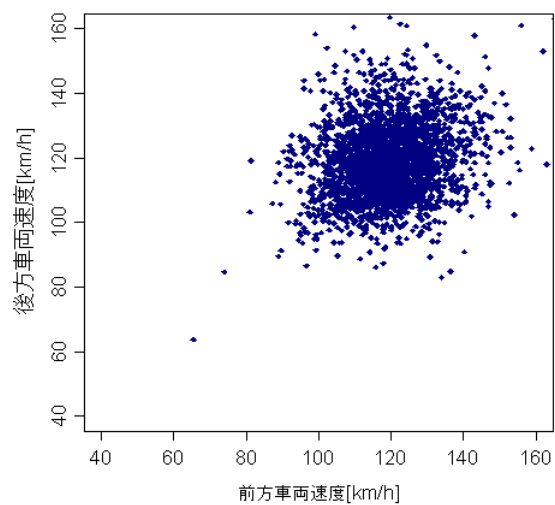


図 3.13.8 追越車線走行速度散布図
(車頭時間 7 秒以上 8 秒未満)

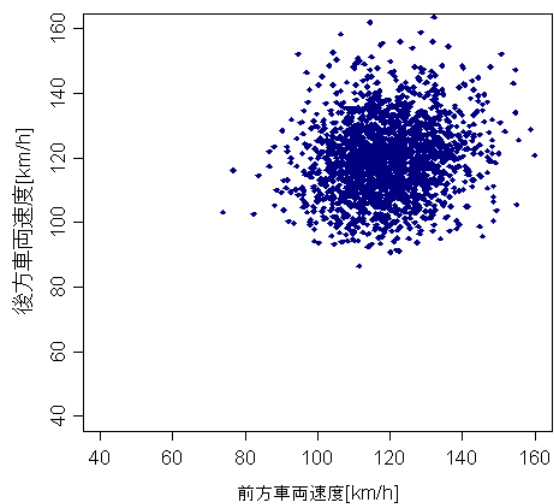


図 3.13.9 追越車線走行速度散布図
(車頭時間 8 秒以上 9 秒未満)

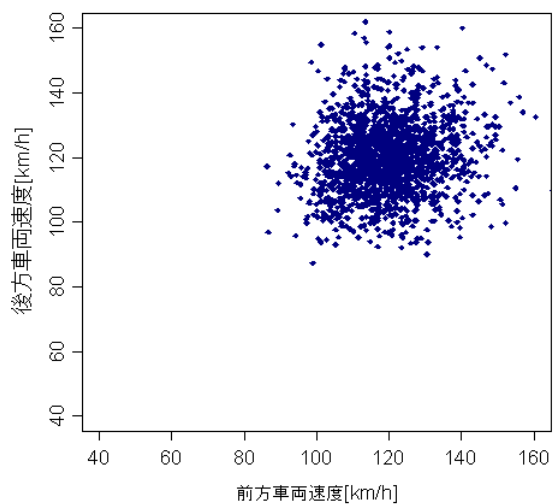


図 3.13.10 追越車線走行速度散布図
(車頭時間 9 秒以上 10 秒未満)

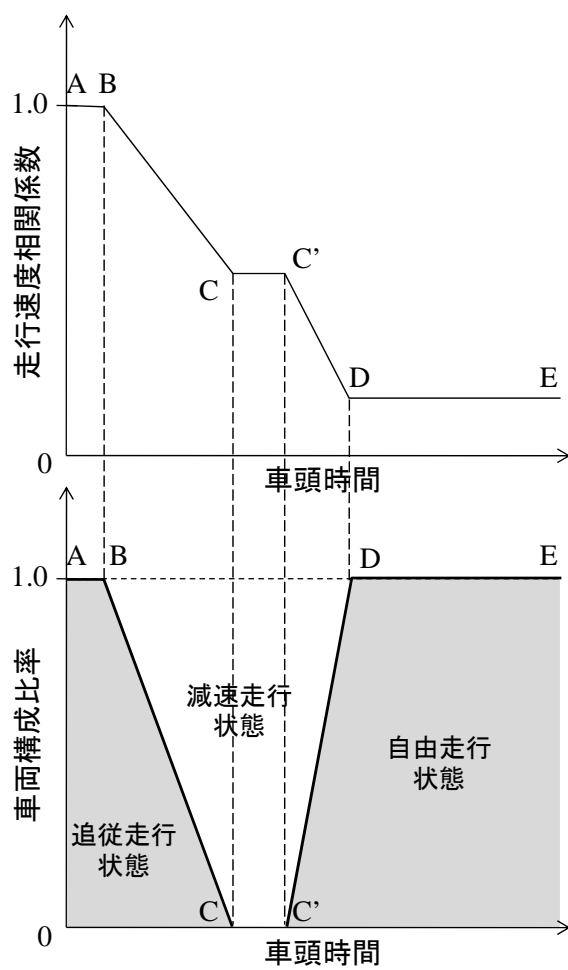


図 3.14 車頭時間と走行速度相関・車両構成比率の模式的関係

3.4.2 東海北陸自動車道上り線 72.6kp 地点

デジタルビデオカメラによる観測で得られた車両データから、車頭時間水準毎の相対速度の平均・標準偏差の関係を求めた。その結果を表 3.2、及び図 3.15 に示す。ただし、車頭時間水準が 0 秒～0.5 秒のデータについてはサンプル数が少ないため、図 3.15 からは除外する。また、表 3.2 は帰無仮説「 H_0 : 相対速度の平均値は 0 である」に関する検定結果も示す。

まず、車頭時間と相対速度の標準偏差の関係に着目すると、車頭時間が大きくなるにつれ相対速度の標準偏差も大きくなる傾向にあることが確認できるが、車頭時間が 8.0 秒以上では相対速度の標準偏差が大きく変動していることが見て取れる。これは、各車頭時間レベルの観測数が 50 サンプル以下と少ないことに起因すると考えられる。

次に、車頭時間と相対速度の平均値の関係に着目すると、車頭時間が 2.0 秒以下と小さい場合は有意に正値を取るのに対し、車頭時間が 6.5 秒以上では負値を取る傾向にあることが確認できる。言い換えると、車頭時間の小さい場合は後方車両の速度の方が高く、車頭時間が大きい場合は前方車両の速度の方が高い傾向にあることを意味する。これは、観測対象地点が付加車線設置区間に挟まれた片側 1 車線区間の終点であることに起因する。

すなわち、車頭時間が小さい状況では、前方の低速車両に対し後方車両が追従状態にあ

表 3.2 車頭時間水準毎の相対速度の平均・標準偏差
(東海北陸自動車道上り線 72.6kp 地点)

車頭時間[sec]	サンプル数	平均[km/h]	標準偏差[km/h]	T
0.0-0.5	3	1.497	7.356	
0.5-1.0	347	2.544	3.771	12.548 **
1.0-1.5	1,031	2.205	6.286	11.260 **
1.5-2.0	1,119	0.732	6.521	3.751 **
2.0-2.5	797	-0.049	7.007	-0.196
2.5-3.0	551	-0.012	7.236	-0.040
3.0-3.5	377	-0.434	7.772	-1.082
3.5-4.0	243	-0.734	8.229	-1.388
4.0-4.5	179	0.127	7.913	0.214
4.5-5.0	147	-1.114	9.127	-1.475
5.0-5.5	115	0.794	8.190	1.036
5.5-6.0	98	-0.406	9.156	-0.436
6.0-6.5	87	0.399	8.106	0.457
6.5-7.0	69	-2.744	10.201	-2.218
7.0-7.5	67	-1.481	9.811	-1.226
7.5-8.0	67	-0.733	9.187	-0.648
8.0-8.5	52	0.480	17.215	0.199
8.5-9.0	47	-2.732	10.820	-1.712
9.0-9.5	45	-2.645	10.100	-1.737
9.5-10.0	38	-1.531	12.300	-0.757
10.0-10.5	34	-3.583	10.455	-1.969
10.5-11.0	27	1.703	13.343	0.651
11.0-11.5	26	-2.417	14.171	-0.853
11.5-12.0	27	-1.830	16.351	-0.571
12.0-12.5	39	-4.063	9.042	-2.770 *
12.5-13.0	18	0.021	15.510	0.005
13.0-13.5	24	0.233	12.111	0.092
13.5-14.0	25	-3.994	8.336	-2.347
14.0-14.5	31	0.902	17.093	0.289
14.5-15.0	16	-2.212	13.344	-0.642

* p=0.05, **p=0.01

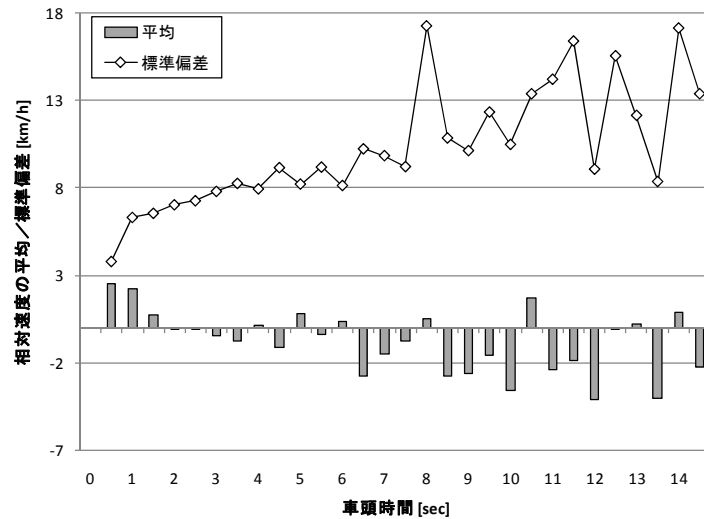


図 3.15 車頭時間水準毎の相対速度の平均・標準偏差

り，対象区間に続く付加車線設置区間で前方車両を追越すために加速する状態にあることが予想される．そのため，後方車両の走行速度が前方車両速度を上回り，相対速度の平均が正值となる．一方，車頭時間が大きい車両間では，前方車両に対し後方車両の希望走行速度の方が低い傾向にあることが推察される．結果，相対速度の平均が負値を取ると考えられる．

続いて，車頭時間と走行速度相関の関係に着目する．図 3.16 に車頭時間と走行速度相関係数の関係を，図 3.17.1～図 3.17.11 に車頭時間レベル毎の前方車両速度－後方車両速度散布図を示す．ただし，十分なサンプル数を確保するため，車頭時間水準を 1 秒単位で設定した．

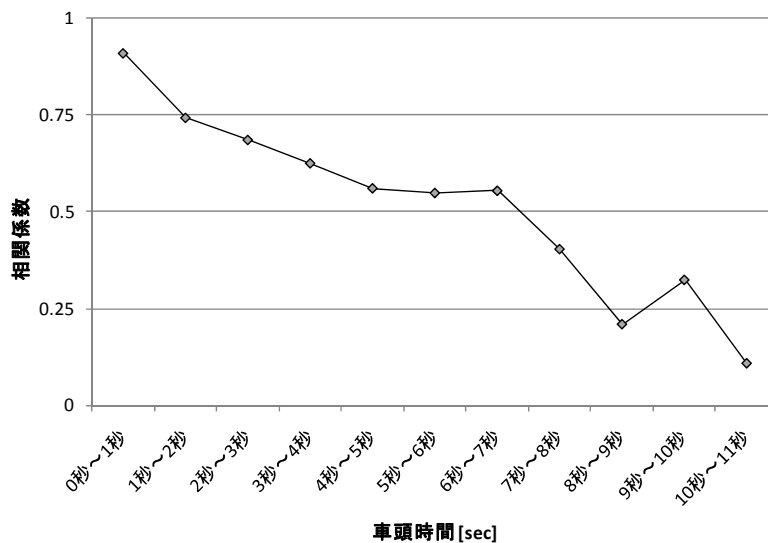


図 3.16 車頭時間と走行速度相関係数の関係

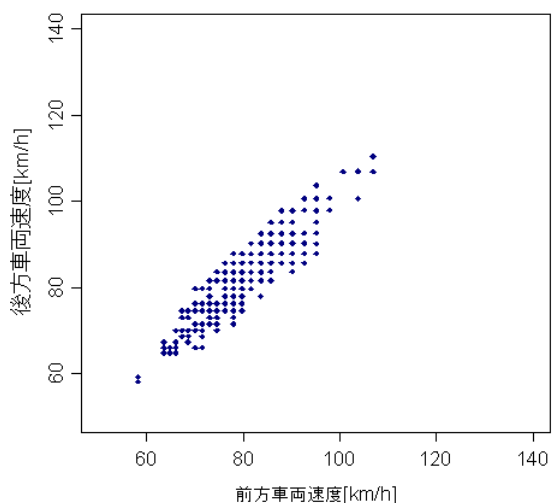


図 3.17.1 東海北陸道走行速度散布図
(車頭時間 0 秒以上 1 秒未満)

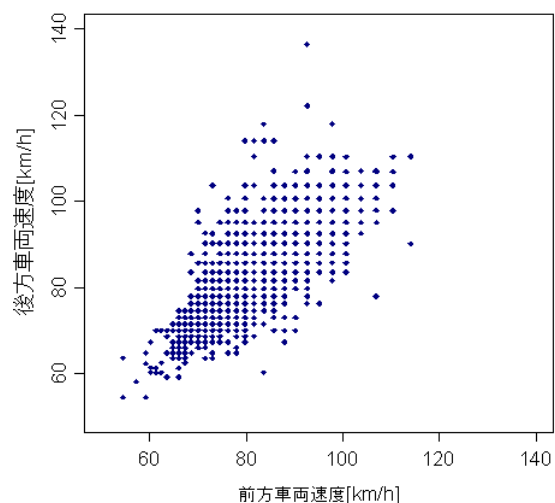


図 3.17.2 東海北陸道走行速度散布図
(車頭時間 1 秒以上 2 秒未満)

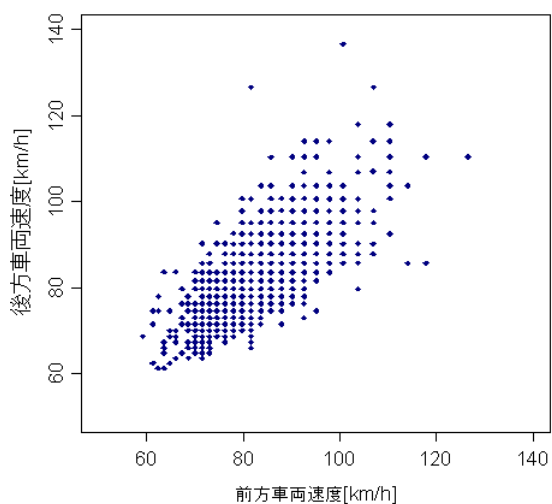


図 3.17.3 東海北陸道走行速度散布図
(車頭時間 2 秒以上 3 秒未満)

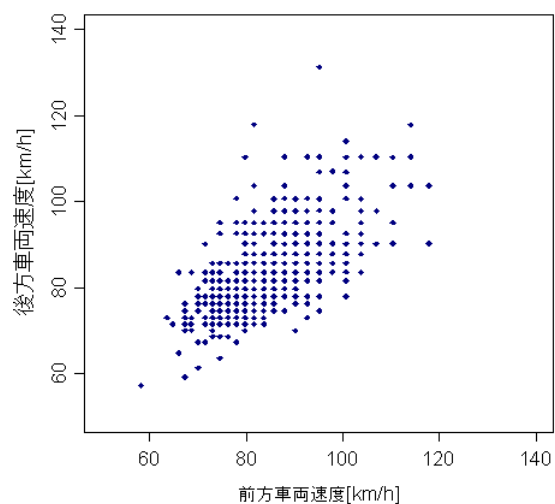


図 3.17.4 東海北陸道走行速度散布図
(車頭時間 3 秒以上 4 秒未満)

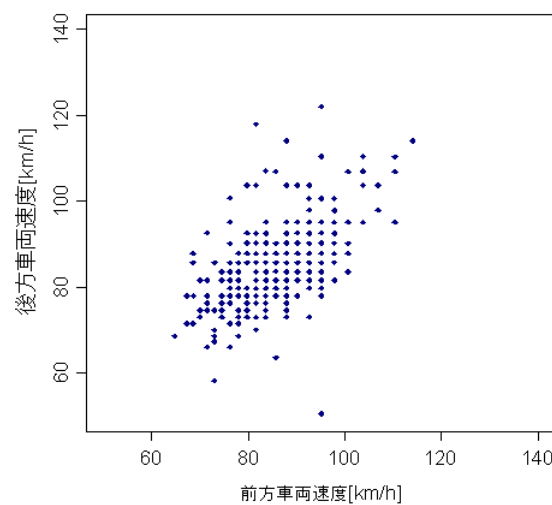


図 3.17.5 東海北陸道走行速度散布図
(車頭時間 4 秒以上 5 秒未満)

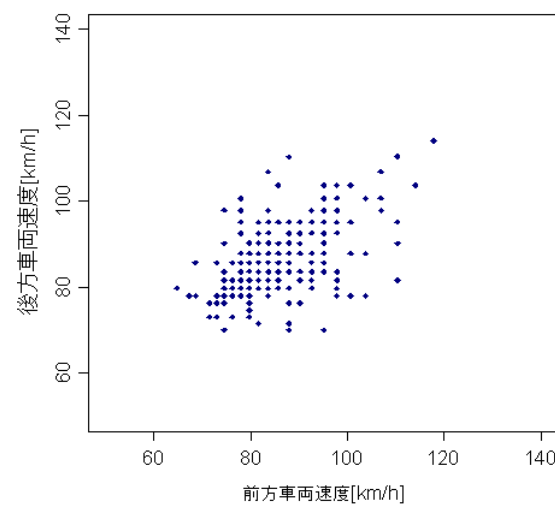


図 3.17.6 東海北陸道走行速度散布図
(車頭時間 5 秒以上 6 秒未満)

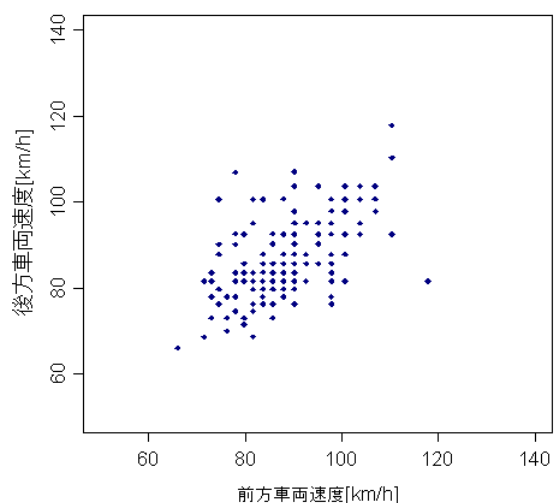


図 3.17.7 東海北陸道走行速度散布図
(車頭時間 6 秒以上 7 秒未満)

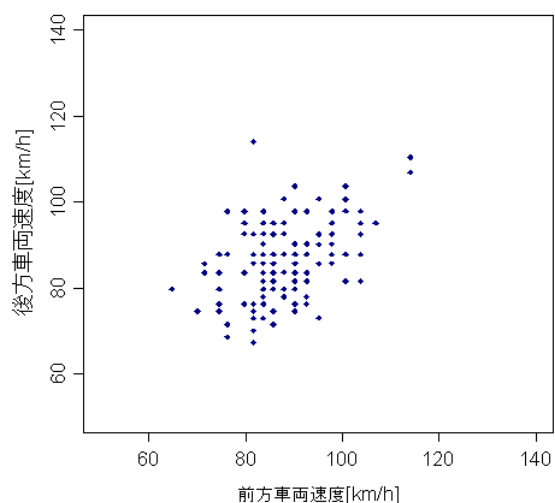


図 3.17.8 東海北陸道走行速度散布図
(車頭時間 7 秒以上 8 秒未満)

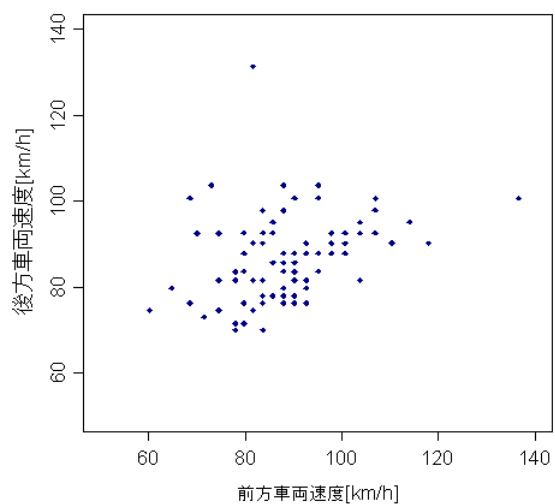


図 3.17.9 東海北陸道走行速度散布図
(車頭時間 8 秒以上 9 秒未満)

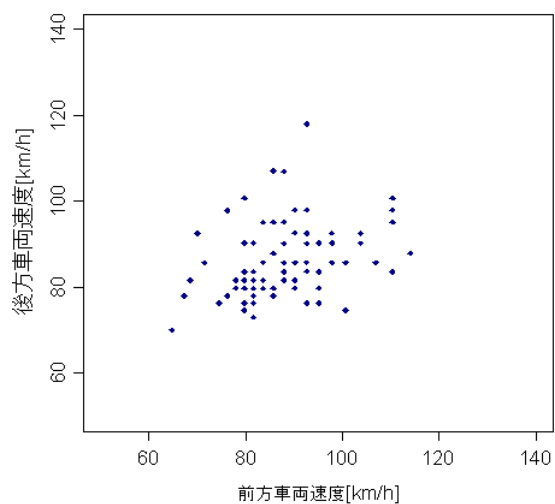


図 3.17.10 東海北陸道走行速度散布図
(車頭時間 9 秒以上 10 秒未満)

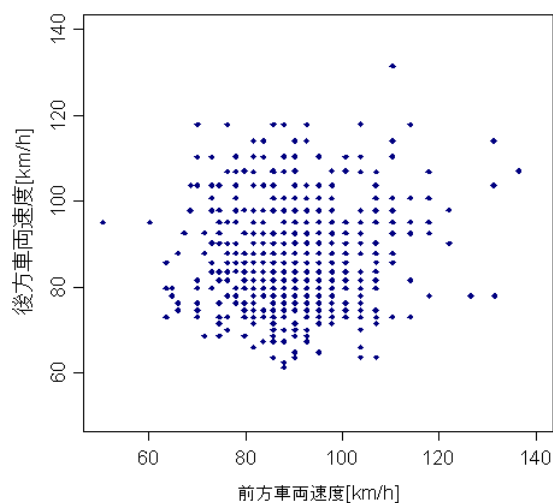


図 3.17.11 東海北陸道走行速度散布図
(車頭時間 10 秒以上)

図より、車頭時間が増加するに従い、連続する2車両間の走行速度の相関係数も低下する傾向にあるが、車頭時間4.0秒～7.0秒で一旦下げ止まり、最終的に車頭時間が7.0秒以上になると相関係数は急激に低下することがわかる。これは各車頭時間水準における車両走行状態の構成比率が図3.14によって表されることに由来すると考えられる。

すなわち、車頭時間が1.0秒未満と小さい場合は前方車両に対してほぼ全ての車両が追従状態にあり非常に高い走行速度相関を持つ。車頭時間が大きくなるにつれ、追従状態にある車両の割合は減少し、減速状態にある車両の割合が増加する。そのため、走行速度相関は車頭時間の増大に伴い減少する。車頭時間が4.0秒～7.0秒の場合はほぼ全車両が減速状態になり、車頭時間7.0秒～9.0秒では減速状態にある車両と自由走行車両が混在する状況となる。さらに車頭時間が大きくなり9.0秒以上となった時点でほぼすべての車両が自由走行状態となるため、走行速度相関が急激に低下する。

以上を勘案し、本研究では高速道路片側1車線区間での自由走行と追従走行の車頭時間閾値として4.0秒を用い、車頭時間4.0秒未満の車両を追従走行、4.0秒以上の車両を自由走行と定義する。

3.5 結語

本章では追従走行と自由走行の車頭時間閾値を決定するために、連続する2車両間の走行速度相関に着目し、車頭時間水準と走行速度相関係数の関係を実データに基づいて算出した。その結果、高速道路片側2車線区間の場合、走行車線では5.5秒、追越車線では4.0秒を、高速道路片側1車線区間の場合では車頭時間4.0秒を追従走行と自由走行の車頭時間閾値として用いることが妥当であることを示した。

しかし、本研究では追従走行と自由走行の車頭時間閾値についての検討を行う上で、車両の走行状態は大別して1) 追従走行状態、2) 自由走行状態、3) 自由走行から追従走行へ遷移するための減速状態、の3段階に分類できること、及び各走行状態に対して一意に走行速度相関が決定されることを仮定した。今後は、本仮定の妥当性を実観測データに基づいて検証する必要がある。

第3章 参考文献

- 1) National Research Council: Highway Capacity Manual 2000 (CD-ROM), Transportation Research Board Special Report 209, TRB, Washington D.C., 2000.
- 2) 田村洋一, 樗木武: 自由車・追従車構成に着目した車頭時間分布モデルに関する研究, 土木学会論文集, 第336号 pp.159-168, 1983.
- 3) (社)交通工学研究会編: 交通工学ハンドブック 2005 (CD-ROM), (社)交通工学研究会, 2005.
- 4) Taweessilp, S., I. Okura and F. Nakamura: Study of platoon characteristics on a multi-lane expressway, Journal of Infrastructure Planning Review, Vol.18, No.5, pp.909-917, 2001.
- 5) Buckley, D.: A semi-Poisson model of traffic flow, Transportation Science 2(2), pp.107-132, 1968.
- 6) Hoogendoorn, S. and P. Bovy: A new estimation technique for vehicle-type specific headway distributions, Transportation Research Record 1646, pp.18-28, 1998.
- 7) Bureau of Public Roads: Highway Capacity Manual 1950, Bureau of Public Roads, Washington, D.C., 1950.
- 8) Pahl, J. and T. Snads: Vehicle interaction criteria from time series measurements, Transportation Science Vol.5, pp.403-417, 1970.
- 9) 山岡努, 片倉正彦, 大口敬, 鹿田成則: 車両感知器パルスデータによる渋滞検出方法に関する研究, 土木計画学研究・講演集, No.23-1, pp.559-562, 2000.
- 10) 中山晴幸, 和田幹彦, 市川孝太郎: スパイラル曲線を用いた交通流シミュレーション・モデルの検討, 第13回交通工学研究発表会論文集, pp.25-28, 1993.
- 11) 葛西誠, 内山久雄, 野中康弘: スパイラル曲線として表現される車両追従挙動のモデル化, 土木学会論文集 D, Vol.60, No.1, pp.65-75, 2007.

第4章 車群形成モデルによる希望走行速度分布と車群台数分布の推定

4.1 概説

交通流は多様な車両によって構成され、走行挙動特性は車種、ドライバーの運転技術、旅行目的など車両によって大きく異なる。この車両走行挙動特性の多様性こそが、交通現象に確率的な側面を持たせ、交通渋滞に始まる数々の交通現象を複雑なものとする一因となっている。そのため、この多様性を的確に捉えることが交通流解析を行う際に必要とされる。車両毎の走行挙動特性を表す指標としては追従時の前方車両との車頭時間や加減速度などが挙げられるが、本研究では希望走行速度に着目する。

希望走行速度とは、車両がある道路区間において、前方車両に追従することなく自由に走行することができる状況での走行速度を意味する。この希望走行速度は車種やドライバーの運転特性などの影響で車両によって異なるため、ある分布形を持つものとして表現される。希望走行速度分布は交通流の多様性を表す指標として交通流シミュレーションなどの交通流解析に必要不可欠であるほか、道路区間のサービス水準¹⁾や道路の設計基準²⁾を表す指標としても用いられている。

高速道路単路区間では希望走行速度の高い車両が、その低い車両に追い付くことにより車群が形成される。車群は低速車両の後方に形成される局所的な混雑状態であるとも言換えられ、車群形成状況を表す指標である **Percent Time-Spent-Following** が高速道路のサービス水準を算定する一つの指標として用いられている³⁾。また、越ら⁴⁾は車群がボトルネックを通過する際に生じる減速波が、車群後方に増幅伝播することで渋滞が発生する可能性があることを指摘している。

そのため、高速道路での交通状況を的確に把握し、効率的な道路運用を行うためには、交通流の多様性を表す指標として適切な希望走行速度分布を取得し、その上で車群の形成状況を正確に把握することが重要となる。

しかしながら、実際の交通流下では希望走行速度分布を計測することはできない。これは観測される車両は、車群の先頭車両や車群から孤立して1台で単独走行する車両など自らの希望走行速度で走行する自由走行車両と、前方車両に追従走行を強いられ自身の希望走行速度より低い速度での走行を強いられる追従走行車両とが混在しているためである。

そこで本章では、高速道路単路部では希望走行速度分布に起因して車群が形成されるとの視点から、希望走行速度分布と車群台数分布の関係に着目する。具体的には、追越しが禁止される一定長の高速道路片側1車線区間を対象とし、希望走行速度分布、片側1車線区間長、流入交通需要量を入力として対象区間での車群形成過程を表現する車群形成モデルを構築する。さらに、車群形成モデルを援用して、交通流観測に基づいて希望走行速度分布を推定する手法や推定された希望走行速度分布に基づいて車群台数分布を推定する手法を構築する。その後、構築した希望走行速度分布推定手法、及び車群台数分布推定手法

を高速道路片側 1 車線区間で観測された交通流データに適用し、その妥当性について検討を行う。

4.2 既往研究のレビューと本研究の位置付け

本章では、車群形成モデルを用いて高速道路単路部片側 1 車線区間での希望走行速度分布、及び車群台数分布を推定する手法を構築する。以下では、希望走行速度分布推定、及び車群台数分布推定に関する既往研究を整理し、本研究の位置づけを行う。

4.2.1 希望走行速度分布推定手法

希望走行速度分布は交通流解析を行う上で必要不可欠な指標であるものの、直接観測によっては導出することができない。従来、このような特徴を備えた交通流に対し、

- (1) 自由走行車両のみの走行速度を観測する^{5)他}
- (2) 総ての車両が自由走行できるような交通需要の少ない時間帯に全車両の走行速度を観測する³⁾

といった、自由走行車両のみの走行速度より希望走行速度分布を導出する手法が用いられてきた。しかし、希望走行速度の高い車両の方が先行車両に追い付き易いことを鑑みると、手法(1)では真の希望走行速度分布より速度を過小評価する傾向にあると考えられる。一方、(2)の手法では、非常に交通量の少ない時間帯に観測を行うことから、渋滞発生直前など交通量の多い時間帯とは交通流を構成する車両群の車両属性に差異が生じ、必ずしも妥当な希望走行速度分布が得られるとは限らない。

Branston⁶⁾はある区間内を走行する任意の車両が走行速度 u で自由走行する確率 $\alpha(u)$ を実走行速度分布、及び希望走行速度分布の関係で表現した。さらに、観測された実走行速度分布と $\alpha(u)$ を用いて、希望走行速度分布を求める手法を構築している。

Botma *et al.*⁷⁾は走行速度の観測を「制限付き観測 (Censored observation)」と見立て、自由走行する車両の走行速度データを「制限なしデータ (Uncensored data)」, 追従走行する車両の走行速度データを「制限付きデータ (Censored data)」と定義し、式(4.1)に示す尤度関数 $L(\theta)$ を最大化するパラメータベクトル $\hat{\theta}$ を導出することで、希望走行速度分布 $f(v|\theta)$ を推定する手法を構築している。

$$L(\theta) = \prod_{i=1}^N [f(v_i | \theta)]^{\delta_i} \cdot [1 - F(v_i | \theta)]^{1-\delta_i} \quad (4.1)$$

ただし、 N は観測された車両台数、 v_i は i 番目に観測された車両の走行速度、 δ_i は i 番目の車両が自由走行状態であれば 1、追従走行状態であれば 0 を取るダミー変数、 $F(v|\theta)$ は自由走行速度分布の確率分布関数をそれぞれ表している。

Hoogendoorn⁸⁾は、同じ車頭時間であっても車両によっては自由走行状態か追従走行状態かが異なるとの視座の下、観測された車頭時間に対する追従走行確率を Composite time headway distribution model⁹⁾を援用して定義した。その上で、Kaplan-Meier method¹⁰⁾を「制

限付きデータ」と「制限なしデータ」が確率的に定義される場合に拡張した **Modified Kaplan-Meier method** を構築し、ノンパラメトリックに希望走行速度分布を推定する手法を考案している。

上述のすべての既往研究は、追従走行車両の希望走行速度は観測された走行速度よりも高い、ということを論拠としている。その上で、提案された手法を実観測データに適用し、推定される希望走行速度分布が自由走行車両のみの走行速度分布より速度の高い方向にシフトしていることを確認している。しかしながら、いずれの手法も希望走行速度によらず前方車両に追従する確率は等しいとの仮定の上で推定手法が構築されている。実際の交通流では、希望走行速度の高い車両ほど前方車両に追いつき易く、追従走行を強いられる確率が高くなると考えられる。特に交通量の多い場合は、少ないときと比べて追従車両の割合が高くなる。一方で、上述の手法では交通量が多く、追従車両の割合が高くなった場合、希望走行速度分布を過大評価する傾向にあることが予想され、推定結果にバイアスが生じることが考えられる。

中村ら¹¹⁾は、希望走行速度の高い車両が低い車両に追いつく確率を考慮した上で、単路区間上の2地点で観測される走行速度分布、及び車頭時間分布から、希望走行速度分布を推定する手法を構築している。しかし、大小2種類の走行速度のみが存在するといった極めて単純な状況での適用に留まっており、推定手法の一般化が今後の課題となっている。

以上を踏まえ、本研究では、任意の車両が前方車両に追いつき、追従走行を強いられる確率はその希望走行速度によって異なるという現象を考慮した希望走行速度分布推定手法を構築する。その上で、走行車両群の属性に大きな差が無いことが期待され、かつ交通量レベルの異なる交通流データを用いて希望走行速度分布の推定を行い、既往研究による推定手法との比較でバイアスの少ない希望走行速度分布が推定可能であることを検証する。

4.2.2 車群台数分布推定手法

車群とは低速度走行車両を先頭に形成される局所的に高密度な交通流状態であり、高速道路のサービス水準を著しく低下させる他、渋滞発生要因としても指摘されている。そのため、交通流状態を的確に把握することを目的に、これまでにいくつかの車群台数分布推定手法が提案され、その精度検証も広く行われている¹²⁾¹³⁾¹⁴⁾。以下に既往研究で提案された車群台数分布推定手法を整理する。

Geometric distribution model¹⁵⁾は先行車両と後続車両が同一の車群に属する確率を p とし、ベルヌイ試行を仮定した上で i 台の車群が形成される確率 $\text{Pr}[i]$ を式(4.2)で算出するものである。

$$\text{Pr}[i] = (1-p) \cdot p^{i-1} \quad (4.2)$$

ここで、確率 p は車頭時間分布 $g(t)$ と追従／非追従の車頭時間の閾値 h_c との関係で、

$$p = \int_0^{h_c} g(t) dt \quad (4.3)$$

と表されるため、 $g(i)$ と h_c を定めるだけで車群台数分布を推定可能であり、扱いやすいモデルであるといえる。しかし、確率 p が各車両独立に決定される、との仮定が含まれており、実現象と整合しているとは言い難い。

Miller distribution model¹⁵⁾は先行車両と後続車両が同一の車群に属する確率 p がベータ分布に従うとして、 $\Pr[i]$ を式(4.4)にて算定するものである。

$$\Pr[i] = \frac{(m+1)(m+s+1)!}{s!} \frac{(s+i-1)!}{(m+s+i+1)!} \quad (4.4)$$

ただし、 m, s はベータ分布のパラメータを表す。さらに、経験に基づいて s を0に近似し、パラメータ m を観測車群台数の平均値 \bar{i} が式(4.5)で表されることより算定し、式(4.6)で $\Pr[i]$ を算定する。

$$\bar{i} = \frac{m+1}{m} \quad (4.5)$$

$$\Pr[i] = (m+1)(m+1)! \frac{(i-1)!}{(m+i+1)!} \quad (4.6)$$

このモデルでは車群の大きさによらず確率 p の分布が不変であるとしている。しかし、大きい車群の先頭車両速度分布は小さい車群の分布よりも低速度側にあると考えられ、大きい車群中では小さい車群中よりも p の値が大きくなると予想される。すなわち、確率 p の分布も車群の大きさによって異なるものと考えられる。

Borel-Tanner distribution model¹⁶⁾は車群台数分布が式(4.7)に示す Borel-Tanner 分布¹⁷⁾に従うとしたものである。

$$\Pr[i] = \frac{i^{i-1}}{i!} e^{-\beta i} \cdot \beta^{i-1} \quad (4.7)$$

ただし、 β は分布のパラメータを表し、分布の平均値 \bar{i} の関係で、

$$\beta = 1 - \frac{1}{\bar{i}} \quad (4.8)$$

と表される。そもそも、Borel-Tanner 分布は、ポアソン到着、サービス時間一定を仮定した待ち行列理論において、行列長 i の行列が形成される確率を表す分布として構築された。そのため、観測地点に到達するまでの各車両の挙動は考慮されていない。

上述の各モデルの推定精度については、Geometric distribution model は交通量が少なく車群の形成されにくい状況下で、また、Miller distribution model と Borel-Tanner distribution model は、交通量が多く大きい車群が形成されやすい状況下で推定精度が低くなることが確認されている¹³⁾。これは、交通流に関する強い仮定の下に分布形を設定し、観測車群台数分布を使って同分布のパラメータを推定するというモデルであるという点に起因する。すなわち、例えば交通量レベルが大きく異なる場合など、設定した仮定が実際の交通流と乖離する場合には、いずれのモデルも適切に車群台数分布を推定することができない。

Tamura *et al.*¹⁸⁾は、観測される全車両の走行速度分布 $s(u)$ は、車群先頭車両の実走行速度分布 $s_l(u)$ と追従走行車両の実走行速度分布 $s_f(u)$ の合成によって表現されると仮定し、速度 u で走行する車群の車群台数が n である確率 $p_n(u)$ を式(4.9)で算定した上で、 n 台の車群が形成される確率 $p(n)$ を式(4.10)で求める手法を構築している。

$$p_n(u) = \left\{ \frac{w_l s_l(u)}{s(u)} \right\} \left\{ \frac{w_f s_f(u)}{s(u)} \right\}^{n-1} \quad (4.9)$$

$$p(n) = \int_0^\infty p_n(u) s(u) du \quad (4.10)$$

ただし、 w_l は全車両に対する車群中先頭車両の割合、 w_f は追従走行車両の割合をそれぞれ表す。式(4.9)中の各走行速度分布は観測交通量をパラメータとして決定される分布¹⁹⁾であるため、Geometric distribution model 中の先行車両と後続車両が同一の車群に属する確率 p を交通状況に応じた値として表現したモデルであると換言できる。しかし、本モデルでは定常状態にある交通流を仮定している。高速道路上ではオンランプ、オフランプやボトルネックの影響により交通流の定常性は必ずしも保証されないため、モデルの適用に際してはその点を十分に検討する必要があると考えられる。

対する本研究で提案する車群台数分布推定手法は、対象区間上流端での車両到着パターン、希望走行速度分布、区間長を入力として対象区間下流端での車群形成状況を表現する車群形成モデルに基づき、車群台数分布を推定する。この際、後続車両が先行車両に追いつく確率は希望走行速度分布と交通量、区間長の関係のみで算出される。希望走行速度分布は、天候・時間帯・平土休などの交通条件がほぼ同一であれば、交通量によらず一意に推定されることが考えられるため、本推定手法では一旦同一交通条件下での希望走行速度分布が得られれば、交通量レベルによることなく高精度での車群台数分布推定が可能となる。

本章では、提案する車群台数分布推定手法を高速道路片側1車線区間の交通量レベルの異なる観測データに適用し、いずれの交通量レベルにおいても高い精度で車群台数分布が推定可能であることを検証する。

4.3 希望走行速度分布及び車群台数分布推定手法の構築

本節では追越しの制限される片側1車線区間で車群が形成される過程を表現する車群形成モデルを構築、さらに構築したモデルを援用して希望走行速度分布、及び車群台数分布を推定する手法を提案する。

4.3.1 車群形成モデルの構築

本項では追越しの制限される片側1車線区間を対象に車群が形成される過程をモデル化する。追越しの禁止された区間では、希望走行速度の高い車両がその低い車両に追いつくことにより、車群が形成される。この点を鑑み、交通流に関して以下の仮定を置く。

- (i) 各車両は希望走行速度を持ち、自由走行時は各車両の希望走行速度で走行する。ま

た，希望走行速度は所与の希望走行速度分布 $f(v)$ に従い各車両に対して独立に決定される．

- (ii) 各車両は先行車両に追いつくまで希望走行速度を維持するが，先行車両との車頭時間がある閾値以下になった時点以降，与えられた車頭時間を維持しつつ先行車両の走行速度と等しい速度で走行する．
- (iii) 追従走行時の先行車両との車頭時間は各車両によって一意に決定される．

この仮定に基づいた片側 1 車線区間での車両走行軌跡の例をタイムスペースダイアグラム（図 4.1 参照）に表す．図中，実線は各車両の実走行軌跡を，破線は自由走行した場合の軌跡を示し，白丸（○）は区間終点において自由走行状態の車両，黒丸（●）は追従走行状態の車両を表す．このとき， i 番目に流入した車両 i が当該区間の始点を出発した時刻を t_i^{dep} とすると，車両 i が当該区間の終点に到達する時刻 t_i^{arr} は片側 1 車線区間長 L ，車両 i の希望走行速度 v_i ，車両 i の追従時の車頭時間 h_i の関係で式(4.11)のように記述される．

$$t_i^{arr} = \max\left(t_i^{dep} + \frac{L}{v_i}, t_{i-1}^{arr} + h_i\right) \quad (4.11)$$

図 4.1 は，車両 i の希望走行速度が低いために後続車両 $i+1 \sim i+3$ が先行車両に追いつき，車両 i を先頭とする 4 台の車両で構成される車群が形成される様子を表している．このように，片側 1 車線区間において自由走行を維持することのできる車両が車群の先頭車両となり，その車両に対して後続の車両が追いつくことで 1 つの車群が形成される．これより， k 台の車群が形成されるということは，自由走行をしている車群先頭車両に対し後続の $k-1$ 台の車両が追いつくものの，後方 k 台目の車両は追いつかない状況と一般化することができる．ただし，1 台で単独自由走行している車両も 1 台の車群と見なす．

以上より，希望走行速度分布 $f(v)$ ，及び任意の車両 i の対象区間始点への到着時刻 t_i^{dep} を所与として，希望走行速度 v の車両が車群の先頭となる確率（以降，自由走行確率と呼ぶ）

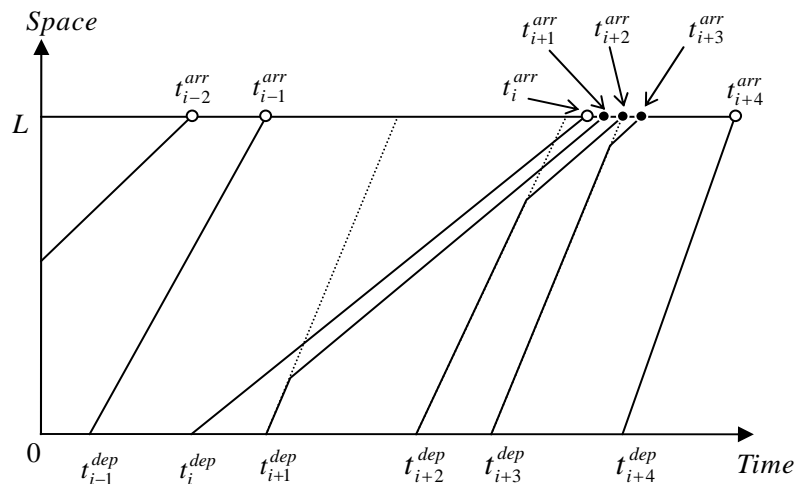


図 4.1 車両走行軌跡の例

$p^{top}(v)$ ，及び希望走行速度 v の車両が自由走行しているという事象 A_v の下，その直後方に $k-1$ 台 ($k=1,2,3,\dots$) の車両が追従する確率 $p(k|A_v)$ を記述することで，車群形成状況の表現が可能となる．以下では， $p^{top}(v)$ ， $p(k|A_v)$ の導出方法を述べる．

(1) $p^{top}(v)$ の導出

まず， i 番目に当該区間に流入し，希望走行速度 v_i を持つ車両 i (以下「当該車両」) が車群の先頭となる確率 $p^{top}(v_i)$ について考える．当該車両が車群の先頭になるということは，1 台前方を走行する先行車両 $i-1$ に追いつかないことと同値である．しかし，先行車両 $i-1$ は必ずしも自由走行を維持できるとは限らない．先行車両 $i-1$ の希望走行速度が十分に高く当該車両が対象区間内で先行車両に追いつくことはなくても，先行車両がさらに前方の車両に追いつき追従走行を強いられた場合，当該車両は先行車両に追いつき自由走行を妨げられる，という事象も生起し得る．そのため，当該車両が対象区間内で自由走行を維持するためには，先行車両を最後尾とする車群に追いつかないことが必要十分条件となる．たとえば，先行車両が k 台の車群の最後尾を走行しているとき，当該車両が自由走行を維持するための必要十分条件は，

$$t_i^{arr} > t_{i-k}^{arr} + \sum_{j=i-k+1}^i h_j \quad (4.12)$$

と表される．

以上より，当該車両が車群の先頭となるためには，前方を走行する全ての車両について，その車両を先頭とし，かつ先行車両を最後尾とする車群に追いつかないこと，換言すると任意の k ($=1, 2, \dots$) に関して，式(4.12)を満たすことが必要十分条件となる．すなわち，希望走行速度 v_i の車両が車群の先頭となる確率は，

$$p^{top}(v_i) = \prod_{k=1}^{\infty} \Pr \left[t_i^{arr} > t_{i-k}^{arr} + \sum_{j=i-k+1}^i h_j \right] \quad (4.13)$$

と書ける．また，式(4.12)は車両 $i-k$ の希望走行速度 v_{i-k} ，当該車両の希望走行速度 v_i ，対象区間長 L の関係で，式(4.14)の様に書き換えることができる．

$$\frac{L}{v_i} + t_i^{dep} > \frac{L}{v_{i-k}} + t_{i-k}^{dep} + \sum_{j=i-k+1}^i h_j \quad (4.14)$$

これを希望走行速度 v_{i-k} の条件式として表すと，

$$v_{i-k} > \frac{L}{\frac{L}{v_i} + \left\{ (t_i^{dep} - t_{i-k}^{dep}) - \sum_{j=i-k+1}^i h_j \right\}} \equiv d_{i,i-k}(v_i) \quad (4.15)$$

となる．このとき，式(4.13)は式(4.15)で定義された $d_{i,i-k}(v_i)$ の関係で，式(4.16)と書き換え可能である．

$$p^{top}(v_i) = \prod_{k=1}^{\infty} \Pr[v_{i-k} > d_{i,i-k}(v_i)] \quad (4.16)$$

これより、希望走行速度 v_i の車両の自由走行確率 $p^{top}(v_i)$ は希望走行速度分布の関係で式(4.17)として記述される。

$$p^{top}(v_i) = \prod_{k=1}^{\infty} \left[\int_{d_{i,i-k}(v_i)}^{\infty} f(u) du \right] \quad (4.17)$$

(2) $p(k|A_v)$ の導出

続いて、希望走行速度 v_i の車両 i が自由走行をしているという事象 A_{v_i} の下で、当該車両を先頭に k 台の車群が形成される確率 $p(k|A_{v_i})$ を求める。 k 台の車両が群を成すということは、車群の先頭である車両 i に対し、車両 $i+1 \sim$ 車両 $i+(k-1)$ が先行車両に追い付き当該車両を先頭とする車群を形成するものの、車両 $i+k$ はこの車群に追い付かないことに等しい。ここで、車両 $i+j$ が車両 i を先頭とする車群に追い付くための必要十分条件は、

$$t_{i+j}^{arr} \leq t_i^{arr} + \sum_{l=i+1}^{i+j} h_l \quad (4.18)$$

と表される。このとき、 $p(k|A_{v_i})$ は式(4.19)として記述される。

$$p(k|A_{v_i}) = \Pr \left[t_{i+k}^{arr} > t_i^{arr} + \sum_{l=i+1}^{i+k} h_l \right] \cdot \prod_{j=1}^{k-1} \Pr \left[t_{i+j}^{arr} \leq t_i^{arr} + \sum_{l=i+1}^{i+j} h_l \right] \quad (4.19)$$

ここで、式中右辺第 1 項は車両 $i+k$ が先行車両に追い付かない確率を、第 2 項は車両 $i+1 \sim$ 車両 $i+(k-1)$ がすべて先行車両に追い付く確率を表している。式(4.15)と同様に、式(4.18)は車両 $i+j$ の希望走行速度 v_{i+j} に関する条件式として以下のように書き換えることができる。

$$v_{i+j} \geq \frac{L}{L/v_i - \left\{ (t_{i+j}^{dep} - t_i^{dep}) - \sum_{l=i+1}^{i+j} h_l \right\}} \equiv e_{i,i+j}(v_i) \quad (4.20)$$

式(4.19)は式(4.20)で定義された $e_{i,i+j}(v_i)$ を用いると、

$$p(k|A_{v_i}) = \Pr[v_{i+k} < e_{i,i+k}(v_i)] \cdot \prod_{j=1}^{k-1} \Pr[v_{i+j} \geq e_{i,i+j}(v_i)] \quad (4.21)$$

と表される。これより、 $p(k|A_{v_i})$ は式(4.22)と書け、希望走行速度分布の関係で記述される。

$$p(k|A_{v_i}) = \left[\int_0^{e_{i,i+k}(v_i)} f(u) du \right] \cdot \left[\prod_{j=1}^{k-1} \left\{ \int_{e_{i,i+j}(v_i)}^{\infty} f(u) du \right\} \right] \quad (4.22)$$

以上で構築した車群形成モデルを用いることにより、希望走行速度分布、対象区間長、対象区間始点への車両到着時刻を所与とすることで片側 1 車線区間における車群形成状況を表現することが可能となる。

4.3.2 車群形成モデルに基づく希望走行速度分布推定手法

本項では、車群形成モデルを援用して希望走行速度分布を推定する手法を構築する。

追越しの禁止された区間では、希望走行速度の高い車両がその低い車両に追い付くこと

により、車群が形成される。形成される車群の大きさは車群先頭車両の速度によって異なり、先頭車両の希望走行速度が低いほどその車両に追い付く車両も多く、大きい車群が形成されると考えられる。また、車群に属して走行する車両は前方車両に追従走行をしていることを考えると、車群内のすべての車両は先頭車両とほぼ等速度で走行していると考えられる。すなわち、観測される車群はその車群台数と先頭車両速度によって特徴づけられる。そこで、車群先頭車両の走行速度と車群台数に着目し、これらの観測値を最も正確に説明することが可能な希望走行速度分布を推定する手法を構築する。

ここで、任意の車両の希望走行速度が v で、かつ k 台の車群の先頭である確率を車群形成確率 $P^{lead}(v, k)$ と定義する。希望走行速度分布 $f(v|\beta)$ を所与とすると、車群形成確率は前述の車群形成モデルに基づいて、

$$P^{lead}(v, k) = f(v|\beta) \cdot p^{top}(v) \cdot p(k|A_v) \quad (4.23)$$

と算出される。ただし、 β は希望走行速度分布 $f(v)$ を記述するパラメータベクトルを表す。式(4.23)から推察されるように、車群形成確率は希望走行速度分布のパラメータベクトル β に依存して算出されることとなる。

実交通流下で観測される車群は車群形成確率に従って形成されるとし、式(4.24)の尤度関数を定義する。

$$L(\beta) = \prod_{i=1}^N P^{lead}(\tilde{v}_i, \tilde{k}_i | \beta) \quad (4.24)$$

ただし、 N は観測によって得られた全車群数を表し、 \tilde{v}_i 、 \tilde{k}_i はそれぞれ i 番目の車群の先頭車両速度、車群台数の観測値を示す。この尤度関数 $L(\beta)$ を最大化するパラメータベクトル $\hat{\beta}$ を求めることで、片側 1 車線区間における車群形成状況を最も的確に再現することが可能な希望走行速度分布が得られる。

4.3.3 車群形成モデルに基づく車群台数分布推定手法

本項では上述の車群形成モデルを用いて車群台数分布を算定する手法を提案する。

無作為に 1 つの車群を抽出した際に、その車群の車群台数が i である確率 $P(i)$ は、任意の車両が車群の先頭となる確率 P^{top} に対する、任意の車両が i 台の車群の先頭となる確率 P_i^{top} として式(4.25)で算出される。

$$P(i) = \frac{P_i^{top}}{P^{top}} \quad (4.25)$$

任意の車両が車群の先頭となるためには、任意の希望走行速度を持つ車両が対象区間内で先行車両に追い付かず、自由走行を維持することが必要となる。このとき、任意の車両が車群の先頭となる確率 P^{top} は、式(4.17)で記述される希望走行速度 v の車両が車群の先頭となる確率 $p^{top}(v)$ の関係で式(4.26)として表される。

$$P^{top} = \int_0^{\infty} f(v) \cdot p^{top}(v) dv \quad (4.26)$$

ただし、 $f(v)$ は希望走行速度分布を表す。

一方、任意の車両が i 台の車群の先頭となるためには、車群先頭車両に対し、その後続に $i-1$ 台の車両が追従するものの、後方 i 台目の車両は当該車群に追いつかないことが必要となる。希望走行速度 v の車両が自由走行をしているという事象 A_v の下、当該車両を先頭に k 台の車群が形成される確率 $p(k|A_v)$ は式(4.22)で表されることより、任意の車両が i 台の車群の先頭となる確率 P_i^{top} は、

$$P_i^{top} = \int_0^{\infty} f(v) \cdot p^{top}(v) \cdot p(k|A_v) dv \quad (4.27)$$

と表される。

以上、式(4.26)、式(4.27)を式(4.25)に代入することにより、区間流出地点で台数 i の車群が形成される確率を算出することができる。

4.4 データの概要

4.4.1 データの取得

希望走行速度分布、及び車群台数分布の推定に際し、図 4.2 に示す東海北陸自動車道上り線片側 1 車線区間（区間長 2.1 [km]）の始点 74.7kp 地点（地点 A）と終点 72.6kp 地点（地点 B）で取得されたデータを用いる。当該区間は高速道路暫定 2 車線区間であり、上流、及び下流は付加車線設置区間となっている。

データは渋滞の発生していない状況を対象にビデオ撮影による交通流の観測を行い取得された。その際、地点 A では各車両の通過時刻を、そして地点 B では各車両の走行速度ならびに車頭時間を計測した。ただし、走行速度はビデオ画像内の特定の 2 地点間の通過にかかる所要時間、車頭時間は画像内のある特定断面の通過時刻に基づいて算定した。

交通量の少ない状況（ $Q = 657$ [veh/h]）として 2004 年 7 月 18 日（日）14:30-15:30、渋滞が発生する直前の交通量の多い状況（ $Q = 1,123$ [veh/h]）として 2004 年 7 月 19 日（月、祝）14:45-15:45 に観測を行った。いずれの時間帯も降雨は観測されず、休日昼間の時間帯であることから、走行車両群の属性に大きな差異は無いと考えられる。

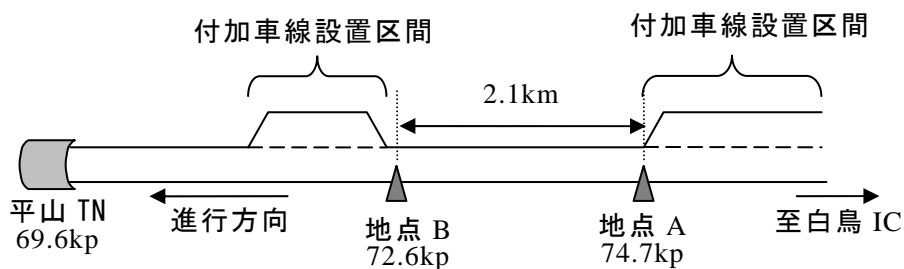


図 4.2 交通流観測地点の概要

各時間帯における車種別の交通量, 平均走行速度を表 4.1 にまとめる. 表に示すように, 大型車, 及びバイクの混入割合は小さいことが確認できる. そこで, 本研究では車種の違いが車群形成に与える影響は無視できるものとする.

次に, 各時間帯における地点 A での車頭時間分布を図 4.3 に示す. これより, 交通量レベルによらず分布形はほぼ同じであり車頭時間 1.0 秒~2.0 秒でピークをとっていること, そして, 交通量レベルの低い 7 月 18 日は交通量レベルの高い 7 月 19 日との比較で大きい車頭時間を持つ車両の割合が高いことが確認できる.

表 4.1 観測データの概要

観測日時	車種	台数 [veh/h]	平均速度 [km/h]	速度の標準 偏差 [km/h]
7月18日 (日)	乗用車	611	83.7	9.73
	大型車	46	81.8	6.73
	バイク	0	-	-
	全体	657	83.6	9.56
7月19日 (月, 祝)	乗用車	1,072	83.3	8.09
	大型車	42	80.3	5.70
	バイク	9	92.4	8.78
	全体	1,123	83.2	8.08

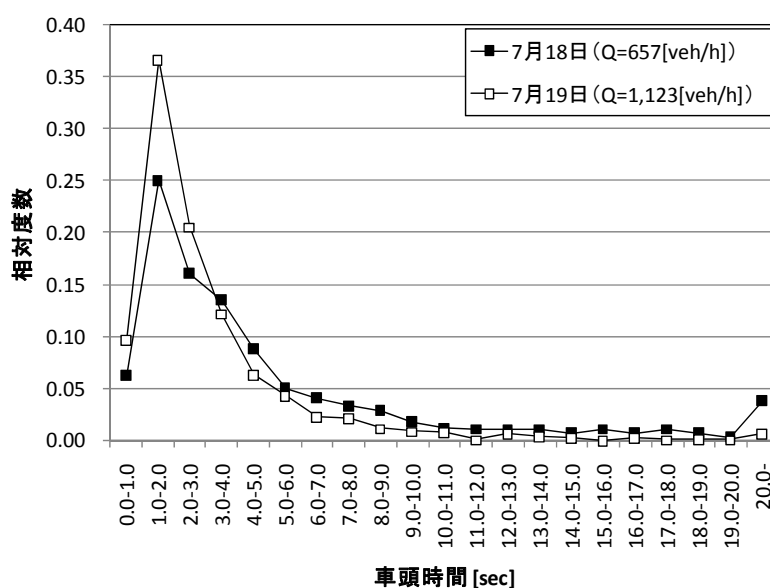


図 4.3 地点 A での観測車頭時間分布

4.4.2 車群の判定

本研究では、先行車両との車頭時間がある閾値以下で走行する車両を追従走行車両、車頭時間がその閾値より大きい車両を自由走行車両と定義する。また、自由走行車両を先頭にその直後方に連なる追従走行車両の一群を車群として定義する。ただし、車頭時間の閾値は第3章の結果を援用し4.0秒とする。

上記の車群判定基準を適用し、実データから車群台数分布を算出した。その結果を表4.2、及び図4.4に示す。ただし、算出に当たっては、観測を開始してから最初に車群先頭車両が出現するまでに観測された車両は車群としてはカウントしていない。これより、流入交通量が多くなるほど、観測される車群数は減り、1つの車群に属する車両数が多くなることが確認できる。

表 4.2 観測日毎の車群形成状況

		全車群	車群先頭車両車種		
			乗用車	大型車	バイク
7月18日 ($Q=657[\text{veh/h}]$)	車群数	219	197	22	0
	平均車群台数	3.00	3.06	2.45	0
	車群台数の標準偏差	6.49	6.34	1.39	0
7月19日 ($Q=1,123[\text{veh/h}]$)	車群数	198	183	13	2
	平均車群台数	5.66	5.80	4.15	2.50
	車群台数の標準偏差	11.79	11.63	1.90	0.41

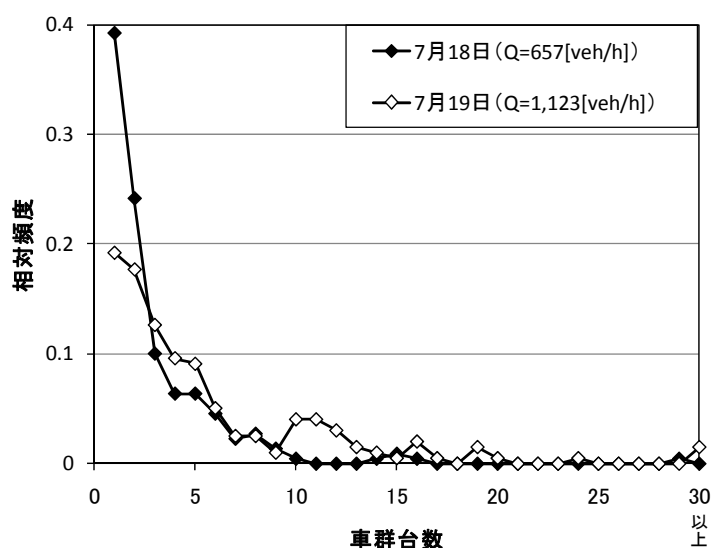


図 4.4 観測日毎の車群台数分布

4.5 希望走行速度分布の推定

本節では、4.3.2 で構築した希望走行速度分布推定手法を適用し、高速道路片側 1 車線区間における希望走行速度分布の推定を行う。希望走行速度分布は、交通流を構成する車両属性、天候や観測時間帯などの走行環境、及び対象区間道路幾何構造によって異なることが考えられる。一方で、これら条件が同一であれば交通量レベルの多少によらず希望走行速度分布に大きな差異はないことが予想される。そこで、希望走行速度分布の推定に当たっては、4.4 で詳述した、走行車両群の属性に大きな差が無いことが期待され、かつ交通量レベルの異なる交通流データを用いる。

4.5.1 希望走行速度分布推定のための条件設定

希望走行速度分布の推定に際し、計算を容易にするため、希望走行速度分布は確率密度関数が式(4.28)で、確率分布関数が式(4.29)で表されるガンベル分布に従うとする。

$$f(x) = \mu \exp\{-\mu(x-\eta)\} \exp[-\exp\{-\mu(x-\eta)\}] \quad (4.28)$$

$$F(x) = \exp[-\exp\{-\mu(x-\eta)\}] \quad (4.29)$$

ただし、 η はガンベル分布の位置を表すロケーションパラメータを、 μ はばらつきを表すスケールパラメータを表す。また、追従走行時の車頭時間は全車両で等しいものとし、地点 B で観測された車頭時間が 4.0 秒以下の車両の車頭時間の平均値 h_{ave} を用いる。実データに基づき算出した結果、 h_{ave} は $Q = 657$ [veh/h] のときに 2.13[sec]、 $Q = 1,123$ [veh/h] のときに 1.96[sec]であった。

本研究では片側 1 車線区間始点への各車両到着パターンについて、(1) 一様到着を仮定した場合と、(2) 実際に観測された到着パターンを用いたときの推定結果の差を検討する。前者を採用した場合は数値解析的に車群形成確率の算出が可能であるが、後者を採用した場合は厳密な値を算出することができない。そこで、後者に関してはモンテカルロ手法を用いて近似的に算定する。以下では、各推定手法について詳述する。

(1) 一様到着を仮定する場合

対象区間の始点に車両が一様到着すると仮定した場合、流入交通量 Q [veh/h] に対し、車両はそれぞれ、 $1/Q$ [hour] 間隔で対象区間に流入することとなる。このとき、式(4.15)中の $d_{i,i-k}(v_i)$ は式(4.30)で、式(4.20)中 $e_{i,i+j}(v_i)$ は式(4.31)で算出される。

$$d_{i,i-k}(v_i) = \frac{L}{\frac{L}{v_i} + \left(\frac{1}{Q} - \frac{h_{ave}}{3600}\right) \cdot k} \quad (4.30)$$

$$e_{i,i+j}(v_i) = \frac{L}{\frac{L}{v_i} - \left(\frac{1}{Q} - \frac{h_{ave}}{3600}\right) \cdot j} \quad (4.31)$$

ただし、本研究では自由流のみを対象に扱うので、

$$Q < \frac{3600}{h_{ave}} \quad (4.32)$$

であるとする．このとき，式(4.30)は任意の i に対して，

$$\lim_{k \rightarrow \infty} d_{i,i-k}(v_i) = 0 \quad (4.33)$$

が成立する．そこで，自由走行確率 $p^{top}(v_i)$ の算定には $d_{i,i-k^*}(v_i) \approx 0$ を満たす k^* を用い，簡易的に次式を用いる．

$$p^{top}(v_i) = \prod_{k=1}^{k^*} \left[\int_{d_{i,i-k}(v_i)}^{\infty} f(u) du \right] \quad (4.34)$$

希望走行速度分布を $\beta = (\eta, \mu) = (90.0, 0.1)$ (平均:95.8 [km/h], 標準偏差:12.8 [km/h]) に対応のガンベル分布とし， $Q = 657$ [veh/h]，及び $Q = 1,123$ [veh/h] としたときの，自由走行確率 $p^{top}(v)$ を図 4.5 に，車群形成確率 $P^{lead}(v, k)$ (ただし， $k=1, 2, 3$) を図 4.6 に示す．まず，図 4.5 より，交通量の多い時は交通量の少ない時と比べて，希望走行速度と自由走行確率の関係曲線が走行速度の低い方向へシフトしていることが読み取れる．これは，交通量が多くなると希望走行速度が同じであっても前方車両に追いつきやすくなることを示し，実際の交通状況を表現しているといえる．一方，図 4.6 より， $k=1$ の単独走行をしている車両の走行速度分布と，2 台及び 3 台からなる車群の先頭車両の走行速度分布を比較すると，交通量の大小によらず，車群台数が多くなるにつれ車群先頭車両の走行速度分布が左側にシフトしていることが確認できる．つまり，大きい車群の先頭車両ほど走行速度が低い傾向にあるということを示している．また，交通量が大きくなると前方車両に追いつき易く，区間内で自由走行を維持できる確率が低下するという現象を反映して，交通量が大きいときは全体的に車群形成確率が小さくなっている．

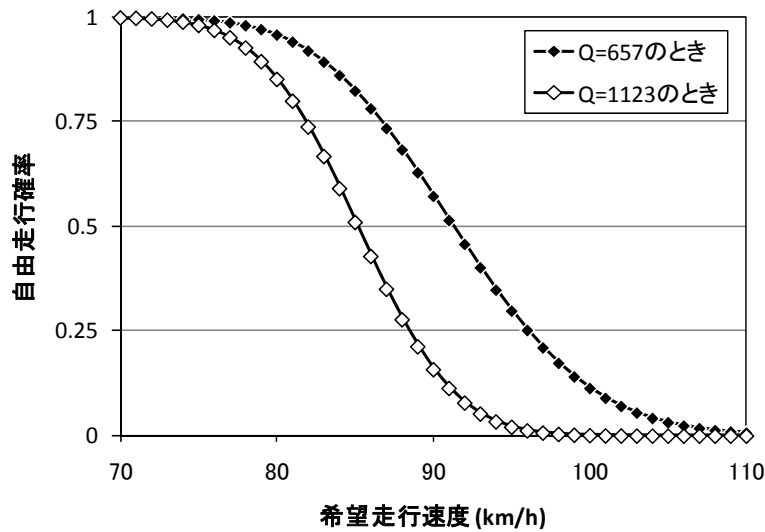


図 4.5 希望走行速度に対する自由走行確率

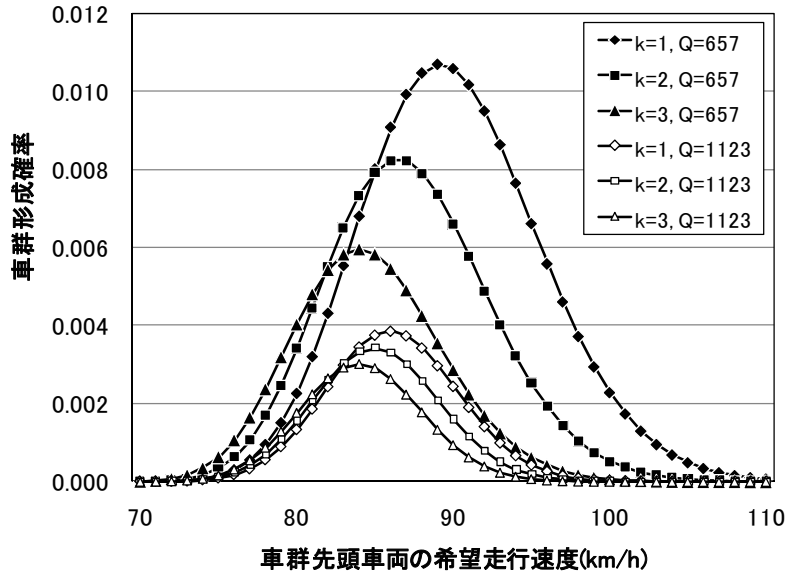


図 4.6 交通量・車群台数別の車群形成確率

上記のように算定される車群形成確率に基づき、式(4.35)を満たす $\hat{\beta}=(\hat{\eta}, \hat{\mu})$ を推定する。ただし、パラメータの推定に際しては、 (η, μ) 平面上の領域 $80.0 \leq \eta \leq 110.0$, $0.05 \leq \mu \leq 0.15$ における $\tilde{L}(\beta)$ について、格子間隔 $\Delta\eta = 0.1$, $\Delta\mu = 0.001$ として全格子点を探索する。

$$\begin{aligned} \hat{\beta} &= \arg \max L(\beta) = \arg \max \tilde{L}(\beta) \\ \tilde{L}(\beta) &= \ln L(\beta) = \sum_{i=1}^N \ln P^{lead}(\tilde{v}_i, \tilde{k}_i | \beta) \end{aligned} \quad (4.35)$$

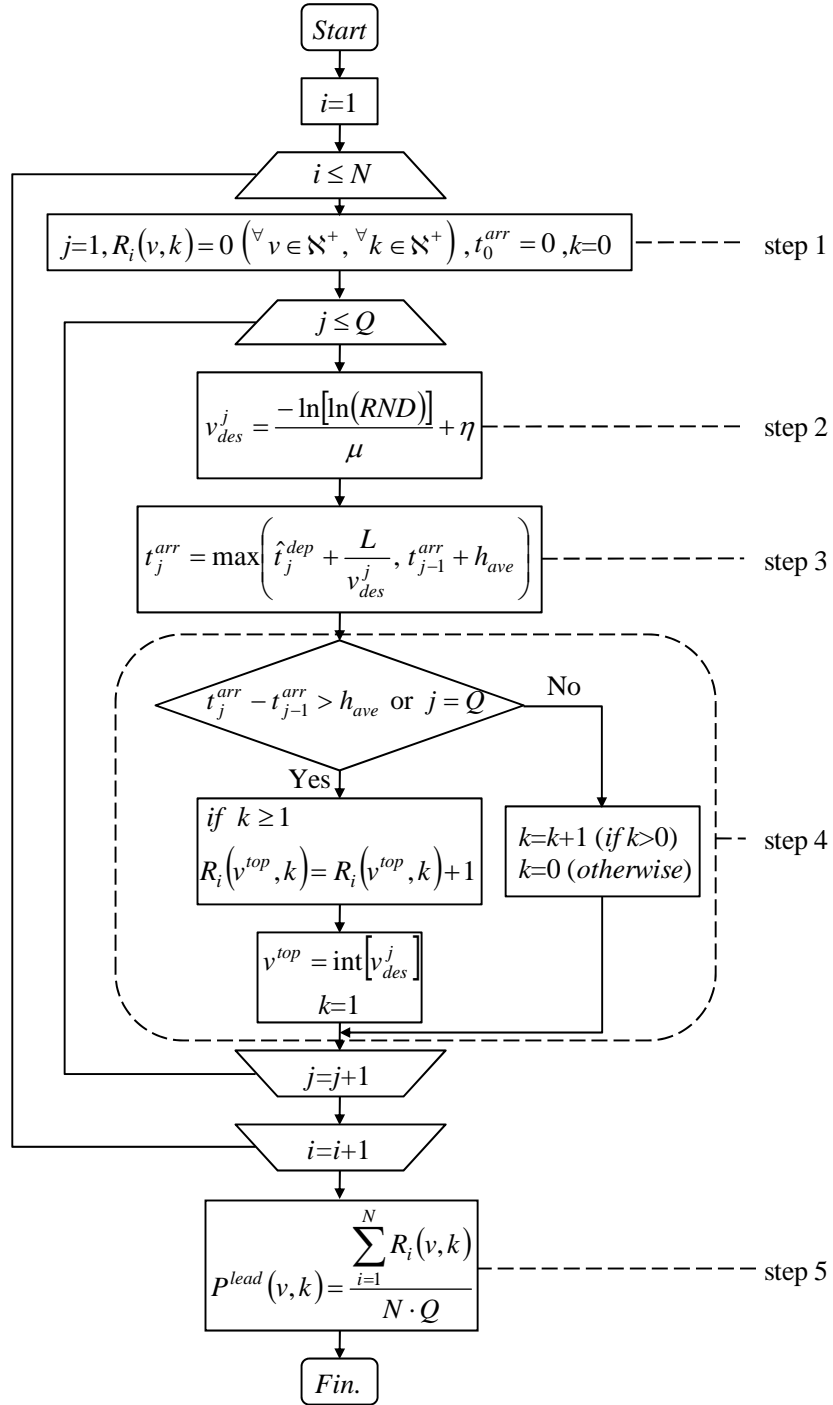
(2) 実到着パターンを用いる場合

地点 A に車両が到着した時刻のデータを用いて、希望走行速度分布の推定を行う場合、解析的に値を算出することができない。そこで、モンテカルロ手法を用いて近似的に車群形成確率を求め、希望走行速度分布を推定する。具体的な計算フローを図 4.7 のフローチャートに示す。ただし、 N は繰り返し計算回数を、 Q は観測交通量[veh/h]を表す。また、図中各 step の所作について以下に詳述する。

step 1 各変数を初期化する。ただし、 j は各繰り返し計算時での発生車両台数、 k は車群を構成する車両台数、 $R_i(v, k)$ は i 回目繰り返し計算時での先頭車両速度 v かつ車両台数 k の車群出現頻度、 t_j^{arr} は車両 j の区間流出時刻を表す。

step 2 地点 A で観測された各車両に対し、所与の希望走行速度分布（パラメータベクトル $\beta=(\eta, \mu)$ ）に従ってランダムに希望走行速度を与える。すなわち、車両 j の希望走行速度 v_{des}^j を式(4.36)により算出する。ただし、 RND は 0-1 の間に一様分布する乱数を示す。

$$v_{des}^j = \frac{-\ln[-\ln(RND)]}{\mu} + \eta \quad (4.36)$$



- i : 繰り返し計算回数 ($i \leq N$)
 j : 各繰り返し計算時の発生車両台数 ($i \leq Q$)
 k : 車群台数
 $R_i(v, k)$: i 回目繰り返し計算時の先頭車両 v 車両台数 k の車群出現頻度
 t_j^{arr} : 車両 j の区間流出時刻
 v_{des}^j : 車両 j の希望走行速度
 μ, η : 希望走行速度分布パラメータ
 L : 対象片側1車線区間長
 \hat{t}_j^{dep} : j 番目に観測された車両の区間流入時刻
 h_{ave} : 追従車両車頭時間

図 4.7 車群形成確率の算出方法

step 3 観測によって得られた j 番目車両の地点 A 通過時刻 \hat{t}_j^{dep} に基づき，式(4.37)に従って車両 j の区間流出時刻 t_j^{arr} を算出する．

$$t_j^{arr} = \max \left(\hat{t}_j^{dep} + \frac{L}{v_{des}^j}, t_{j-1}^{arr} + h_{ave} \right) \quad (4.37)$$

step 4 step 3 の結果より抽出されるすべての車群を先頭車両速度 v^{top} と車群台数 k で分類し，それぞれの車群出現度数 $R_i(v^{top}, k)$ を集計する．その際，先頭車両速度は 1 [km/h] 単位で離散化する．

step 5 step 1～step 4 の所作を，乱数列を変えて N 回繰り返す，近似的な車群形成確率 $P^{lead}(v, k)$ を式(4.38)にて算出する．

$$P^{lead}(v, k) \approx \frac{\sum_{i=1}^N R_i(v, k)}{N \cdot Q} \quad (4.38)$$

以下では繰り返し回数 $N=10,000$ として車群形成確率を算出し，式(4.35)を満たす $\hat{\beta}=(\hat{\eta}, \hat{\mu})$ を探索する．

4.5.2 希望走行速度分布の推定結果

既存手法との比較を行うため，本研究で提案する手法に加え，1) 自由走行車両（車頭時間が 4.0 秒より大きい車両）のみの走行速度分布，2) Botma *et al.*⁷⁾によって提案された式(4.1)による既往の推定手法を用いて希望走行速度分布を導出した．その結果を表 4.3，及び図 4.8～図 4.11 に示す．

これらより，既往推定手法，及び本研究による推定手法ともに，推定された希望走行速度分布が自由走行車両の速度分布と比較して走行速度の高い方向にシフトしていることが分かる．これは，自由走行している車両は相対的に希望走行速度の遅い車両であるためと考えられ，妥当な推定結果であると言える．

表 4.3 希望走行速度分布の推定結果

		ガンベル分布の パラメータベクトル		平均	標準 偏差	平均値 の差	標準偏 差の差
		η	μ				
自由走行車両の 速度分布	7月18日 (Q = 657[veh/h])	-	-	86.1	9.86	1.92	1.93
	7月19日 (Q=1,123 [veh/h])	-	-	84.2	7.93		
既往手法による 推定値	7月18日 (Q = 657[veh/h])	89.3	0.085	96.1	15.1	6.87	3.50
	7月19日 (Q=1,123 [veh/h])	94.6	0.069	103.0	18.6		
本研究による推定値 (一様到着)	7月18日 (Q = 657[veh/h])	96.9	0.054	107.6	23.7	1.19	2.01
	7月19日 (Q=1,123 [veh/h])	99.0	0.059	108.8	21.7		
本研究による推定値 (実到着パターン)	7月18日 (Q = 657[veh/h])	89.1	0.095	95.2	13.5	1.40	0.30
	7月19日 (Q=1,123 [veh/h])	90.7	0.097	96.6	13.2		

(単位:[km/h])

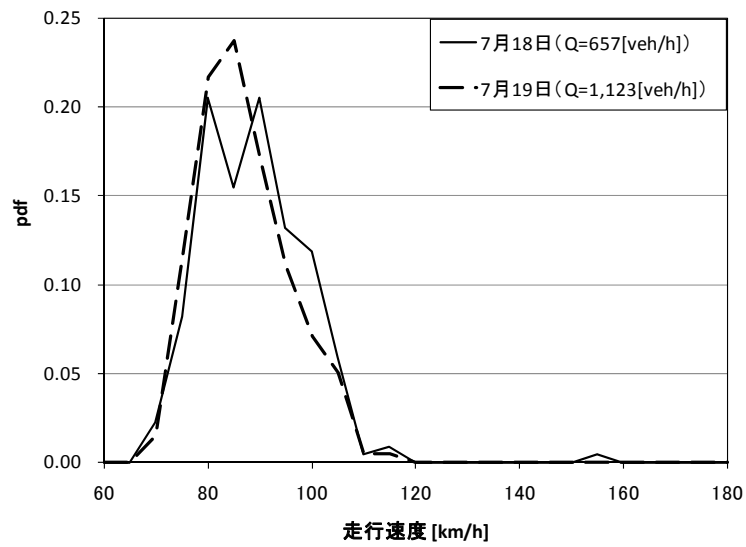


図 4.8 自由走行車両速度分布

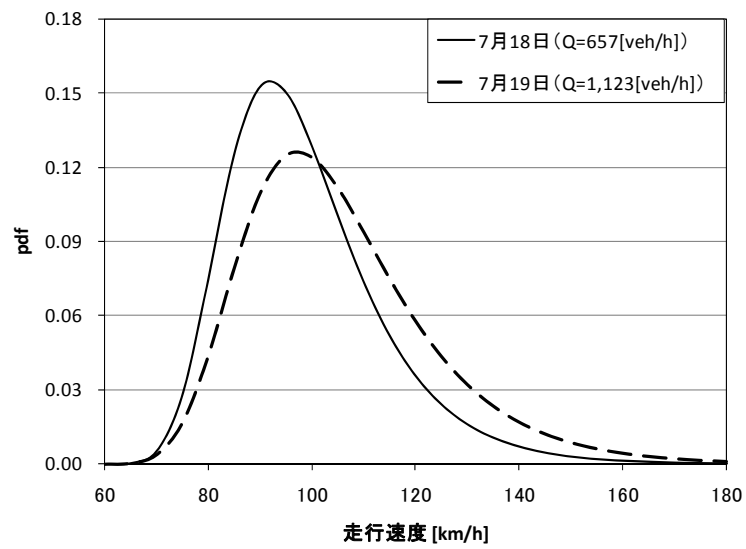


図 4.9 既往手法による推定希望走行速度分布

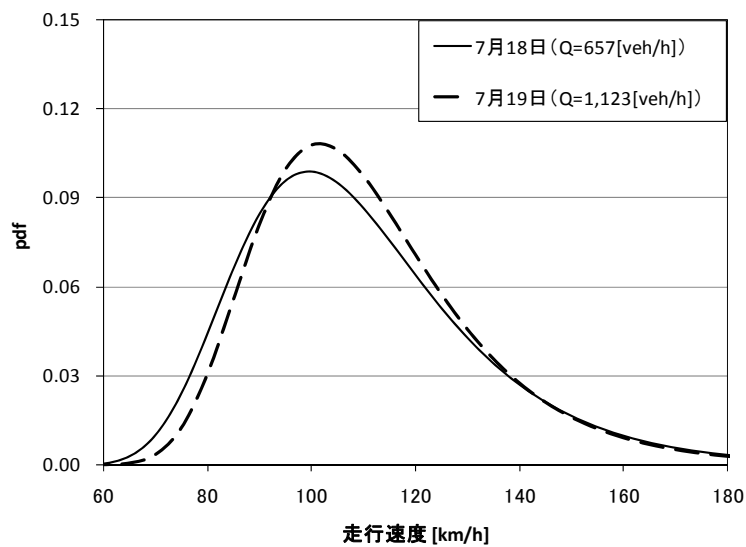


図 4.10 本手法（一様到着）による推定希望走行速度分布

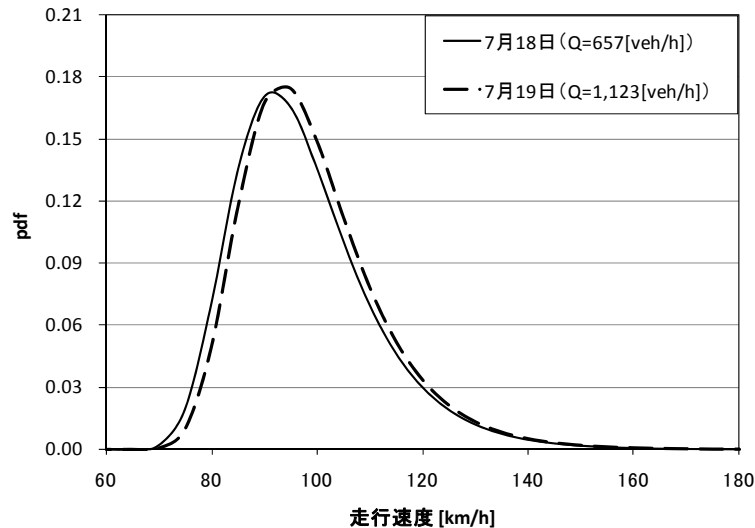


図 4.11 本手法（実到着パターン）による推定希望走行速度分布

次に，既往手法と本手法により推定された希望走行速度分布を流入交通量別に比較する．表 4.3，及び図 4.9，図 4.10 に着目すると，既往手法を用いた場合は，流入交通量レベルの違いによって希望走行速度分布の推定結果が大きく異なっている．具体的には，交通量の多いデータを用いて推定された希望走行速度分布は，交通量の少ないデータを用いて推定された希望走行速度分布と比較して，走行速度の高い方向に位置し，かつ希望走行速度分布の分散も大きいことが確認できる．これは，既往手法では，追従走行車両の希望走行速度は観測された走行速度より高いという点を考慮しているものの，前方車両に追付く確率は考慮されていないことに起因する．すなわち，交通量が多くなると，交通量の少ないときと比べて必然的に追従走行車両の割合が増加する．そのため，式(4.1)で尤度を算出する際に式中右辺第 2 項の要素が大きくなり，推定される希望走行速度分布は必然的に走行速度の高い方向へシフトすることとなる．さらに，交通量が多い状況で自由走行する車両はその希望走行速度が相対的に低いため，推定される分布形は交通量の少ない状況と比べてその分散が大きくなるものと考えられる．

一方，本手法を適用した場合は交通量レベルによらずほぼ同様の希望走行速度分布が推定されていることが確認できる．推定に用いた交通流データは，観測日によらず走行車両群の属性に差がなく希望走行速度分布もほぼ同じであることが予想され，既往手法との比較では，本手法により推定された希望走行速度分布は妥当性が高いと考えられる．

続いて，車両到着パターンに一樣到着を仮定した場合と，観測による到着時刻を用いた場合での推定結果の比較を行う．表 4.3，及び図 4.10，図 4.11 に着目すると，いずれも交通量レベルの違いによる推定結果の差異は極めて小さいものの，一樣到着を仮定した場合と実到着パターンを用いた場合とでは，その結果が大きく異なっていることが確認できる．具体的には，一樣到着を仮定した場合の方が，実到着パターンを用いた場合と比べて，希

望走行速度分布の平均，分散ともに大きい．これは，以下の理由によると考えられる．

図 4.3 から確認できるように，実現象では区間始点に車両が到着する時点で既に低速車を先頭として車群が形成されていることがあり，車両到着時の車頭時間にはばらつきが存在する．対して，一様到着を仮定した場合は車群を形成した状態で区間始点に到着する車両は存在しない．そのため，同一の希望走行速度分布を車群形成モデルに与えて車群台数分布を推定する場合，一様到着仮定時は実到着パターン使用時と比べて車群台数分布を過小に推定する傾向を持つことが予想される．逆に，希望走行速度分布を推定する際には，区間始点への一様到着を仮定した場合，実到着パターンを使用する時と比べて，より車群が形成されやすいような希望走行速度分布が推定されることとなる．結果として，希望走行速度分布の平均，分散共に大きく推定されると考えられる．

4.5.3 推定希望走行速度分布の妥当性検証

推定された希望走行速度分布が妥当であるか否かは，実交通現象の再現可能性により検証できる．そこで，対象区間始点への到着パターンとして一様到着を仮定した場合，実到着パターンを用いた場合の両ケースについて，それぞれ推定された希望走行速度分布を入力として，対象区間終点で観測される車群台数分布を推定，その推定精度検証を行う．ただし，一様到着を仮定した場合は式(4.25)より解析的に車群台数分布の算定が可能であるが，実到着パターンを用いる場合は解析的な算定ができない．そこで，車群形成確率算定時と同様にモンテカルロ法を用いる．具体的な計算フローを図 4.12 にまとめる．ただし，車群台数分布の算出にあたり，繰り返し計算回数 $N=10,000$ とする．

- step 1 各変数を初期化する．ただし， j は各繰り返し計算時での発生車両台数， k は車群を構成する車両台数， $R_i(k)$ は i 回目繰り返し計算時での車両台数 k の車群出現頻度， t_j^{arr} は車両 j の区間流出時刻を表す．
- step 2 地点 A で観測された全車両に対し，所与の希望走行速度分布（7 月 18 日の観測データについては $\eta=89.1$, $\mu=0.095$, 7 月 19 日の観測データについては $\eta=90.7$, $\mu=0.097$ とする）に従うよう式(4.36)に基づきランダムに希望走行速度を与える．
- step 3 観測によって得られた j 番目車両の地点 A 通過時刻 \hat{t}_j^{dep} を用い，式(4.37)に従って車両 j の区間流出時刻 t_j^{arr} を算出する．
- step 4 step 3 の結果より抽出されるすべての車群を車群台数 k で分類し，それぞれの車群出現度数 $R_i(k)$ を集計する．
- step 5 step 1～step 4 の所作を，乱数列を変えて N 回繰り返し，近似的な車群台数分布 $P(k)$ を式(4.39)にて算出する．

$$P(k) \approx \frac{\sum_{i=1}^N R_i(k)}{\sum_{k=1}^{\infty} \sum_{i=1}^N R_i(k)} \quad (4.39)$$

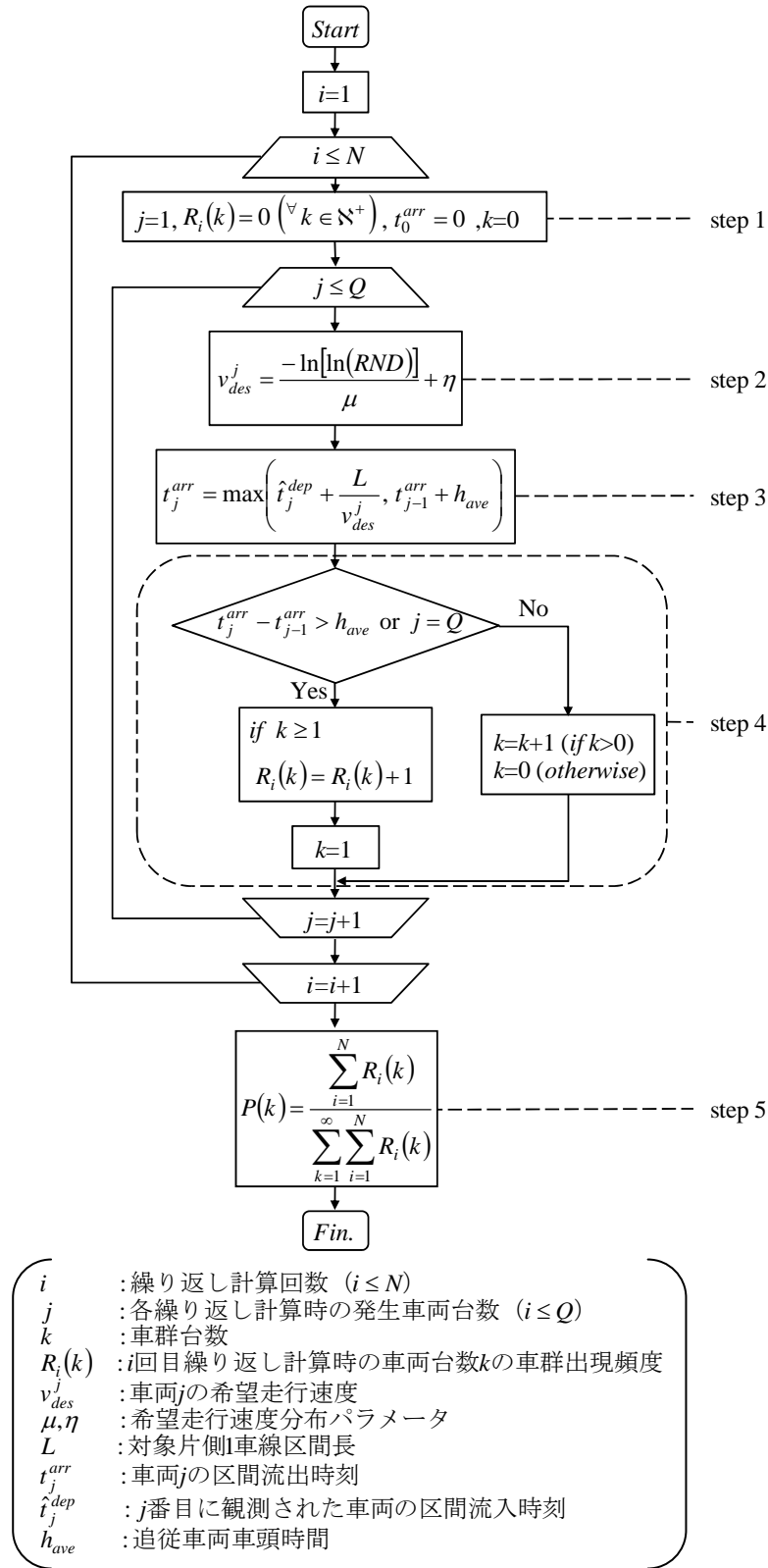
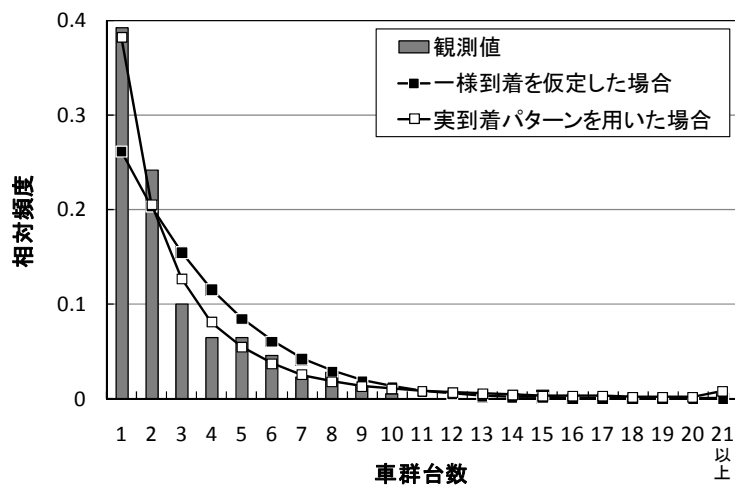


図 4.12 車群台数分布計算フロー

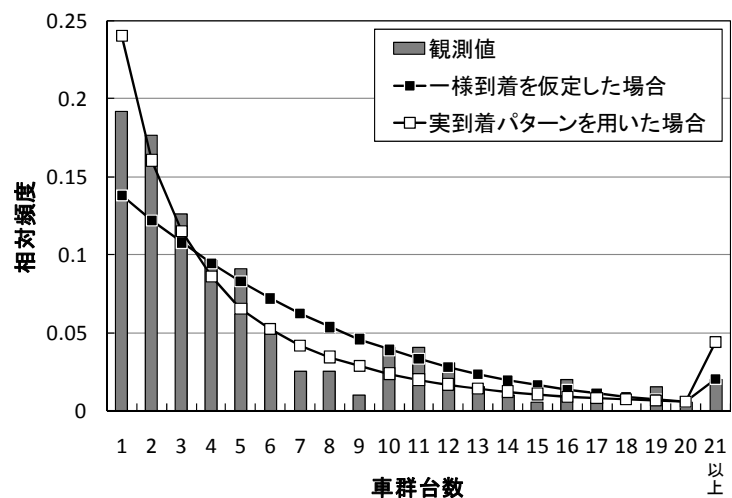
図 4.13 に各観測データを基に推定された車群台数分布を実観測によって得られた車群台数分布と併せて示す．また，車群台数分布の観測値と推定値の適合度を検証するために行った χ^2 検定の結果を表 4.4 に示す．まず，一様到着を仮定した場合， $Q = 657$ の時は

$\chi^2_{0.05,8}=15.51$ に対し $\chi^2_0=29.61$ ，また， $Q = 1,123$ の時は $\chi^2_{0.05,14}=23.69$ に対し $\chi^2_0=25.78$ と求めた．すなわち，どちらの状況でも，5%有意水準において帰無仮説「推定値は実観測値を的確に再現している」を棄却することとなり，推定値は実観測値を的確に再現しているとはいえないことが示された．一方，実到着パターンを用いた場合， $Q = 657$ の時は $\chi^2_{0.05,9}=16.91$ に対し $\chi^2_0=8.92$ ， $Q = 1,123$ の時は $\chi^2_{0.05,13}=22.36$ に対し $\chi^2_0=19.55$ と求まり，どちらの状況でも 5%有意水準において帰無仮説が採択され，推定値は実観測値を的確に再現していることが示された．

これより，実到着パターンを用いて推定した車群台数分布の方が，一様到着を仮定した場合より，的確に片側 1 車線区間における車群形成状況を再現していることが分かる．特に，一様到着を仮定した場合には，小さい車群（車群台数 1 台～3 台）を過小に推定し，やや大きい車群（車群台数 3 台～10 台）を過大に推定する傾向にあることが確認できる．



(a) 7 月 18 日 ($Q=657[\text{veh/h}]$) のデータ



(b) 7 月 19 日 ($Q=1,123[\text{veh/h}]$) のデータ

図 4.13 車群台数分布観測値と推定値

表 4.4 車群台数分布に関する χ^2 検定

(a) 7 月 18 日 ($Q = 657$ [veh/h]) についての χ^2 検定結果

一様到着を仮定した場合					実到着パターンを用いた場合				
級	車群台数区分	観測値 n	推定値 m	$(n-m)^2/m$	級	車群台数区分	観測値 n	推定値 m	$(n-m)^2/m$
1	1	86	57.16	14.56	1	1	86	83.46	0.08
2	2	53	44.42	1.66	2	2	53	44.86	1.48
3	3	22	33.86	4.16	3	3	22	27.64	1.15
4	4	14	25.29	5.04	4	4	14	17.63	0.75
5	5	14	18.48	1.09	5	5	14	11.91	0.37
6	6	10	13.21	0.78	6	6	10	8.18	0.41
7	7	5	9.21	1.93	7	7	5	5.44	0.04
8	8	6	6.27	0.01	8	8-9	9	6.82	0.69
9	9-	9	11.10	0.40	9	10-12	1	5.40	3.58
					10	13-	5	6.58	0.38
		χ_0^2		29.61			χ_0^2		8.92
		df		8			df		9
		$\chi_{0.05, 8}^2$		15.51			$\chi_{0.05, 9}^2$		16.91

(b) 7 月 19 日 ($Q = 1,123$ [veh/h]) についての χ^2 検定結果

一様到着を仮定した場合					実到着パターンを用いた場合				
級	車群台数区分	観測値	推定値	$(n-m)^2/m$	級	車群台数区分	観測値	推定値	$(n-m)^2/m$
1	1	38	27.25	4.24	1	1	38	47.47	1.89
2	2	35	24.14	4.88	2	2	35	31.71	0.34
3	3	25	21.29	0.65	3	3	25	22.70	0.23
4	4	19	18.69	0.01	4	4	19	16.98	0.24
5	5	18	16.33	0.17	5	5	18	12.85	2.06
6	6	10	14.20	1.24	6	6	10	10.26	0.01
7	7	5	12.28	4.31	7	7	5	8.20	1.25
8	8-9	7	19.60	8.10	8	8	5	6.72	0.44
9	10	8	7.70	0.01	9	9	2	5.57	2.29
10	11	8	6.51	0.34	10	10-11	16	8.47	6.70
11	12	6	5.48	0.05	11	12-13	9	6.02	1.47
12	13-14	5	8.41	1.38	12	14-16	7	6.10	0.13
13	15-16	5	5.75	0.10	13	17-20	5	5.28	0.02
14	17-19	4	5.24	0.29	14	21-	4	8.63	2.48
15	20-	5	5.13	0.00					
		χ_0^2		25.78			χ_0^2		19.55
		df		14			df		13
		$\chi_{0.05, 14}^2$		23.69			$\chi_{0.05, 13}^2$		22.36

これは、希望走行速度が速い車両でも地点 A で大きい車頭時間を持って区間に流入した場合、車群の先頭となりうることもあるのに対し、一様到着を仮定した場合はこれを考慮できないためであると考えられる。

以上より、本研究で提案した手法が希望走行速度分布の推定に対して妥当であること、特に、対象区間への車両の到着パターンとして、実観測データを用いた場合によりの確な推定が可能であることを示すことができた。

4.6 車群台数分布推定手法の検証

これまでに提案されている車群台数分布推定手法¹⁵⁾¹⁶⁾では、ある分布形を仮定し平均車群台数をパラメータとして車群台数分布を推定する。そのため、対象とする交通流の交通

量レベルが異なる場合など，前提となる仮定がそぐわない状況では適切な推定値が得られないことが指摘されている¹³⁾．対する本研究で提案する推定手法は希望走行速度分布，対象片側1車線区間長，交通量を入力とするため，交通量レベルによらず精度の高い車群台数分布が推定可能であると期待できる．以下では，本推定手法を4.4で詳述した実観測データに適用し，その推定精度を検証する．

4.6.1 車群台数分布推定のための条件設定

車群台数分布推定の入力に必要なとなる希望走行速度分布は7月19日の観測データから推定された分布 ($\beta=(90.7,0.097)$) のガンベル分布を用いる．また，追従走行時の車頭時間 h_f は2.0秒とし，交通量レベルによらず全車両について等しいとする．対象区間始点への車両到着パターンとして，(1) 一様到着を仮定した場合，(2) アーラン到着（位相1，及び位相2）を仮定した場合の計3ケースを想定し，それぞれの推定精度を検討する．

一様到着を仮定した場合は式(4.25)に従って解析的に推定を行い，アーラン到着を仮定した場合は図4.14のフローに従って推定を行う．以下，図中各stepの所作について詳説する．

- step 1 各変数の初期化を行う．ただし， j は各繰り返し計算時での発生車両台数， k は車群を構成する車両台数， $R_i(k)$ は i 回目繰り返し計算時での車両台数 k の車群出現頻度， t_j^{dep} は車両 j の区間流入時刻， t_j^{arr} は車両 j の区間流出時刻を表す．
- step 2 区間始点への車両 j ($j \leq Q$) の流入時刻 t_j^{dep} を決定する．ただし， Q は流入交通量 [veh/h] を表す．対象区間始点へのアーラン到着を仮定しているため，車両 j の区間始点での車頭時間 h_j [sec] は式(4.40)で算出される．

$$h_j = -\sum_{i=1}^K \frac{1}{\lambda} \ln(1 - RND) \quad (4.40)$$

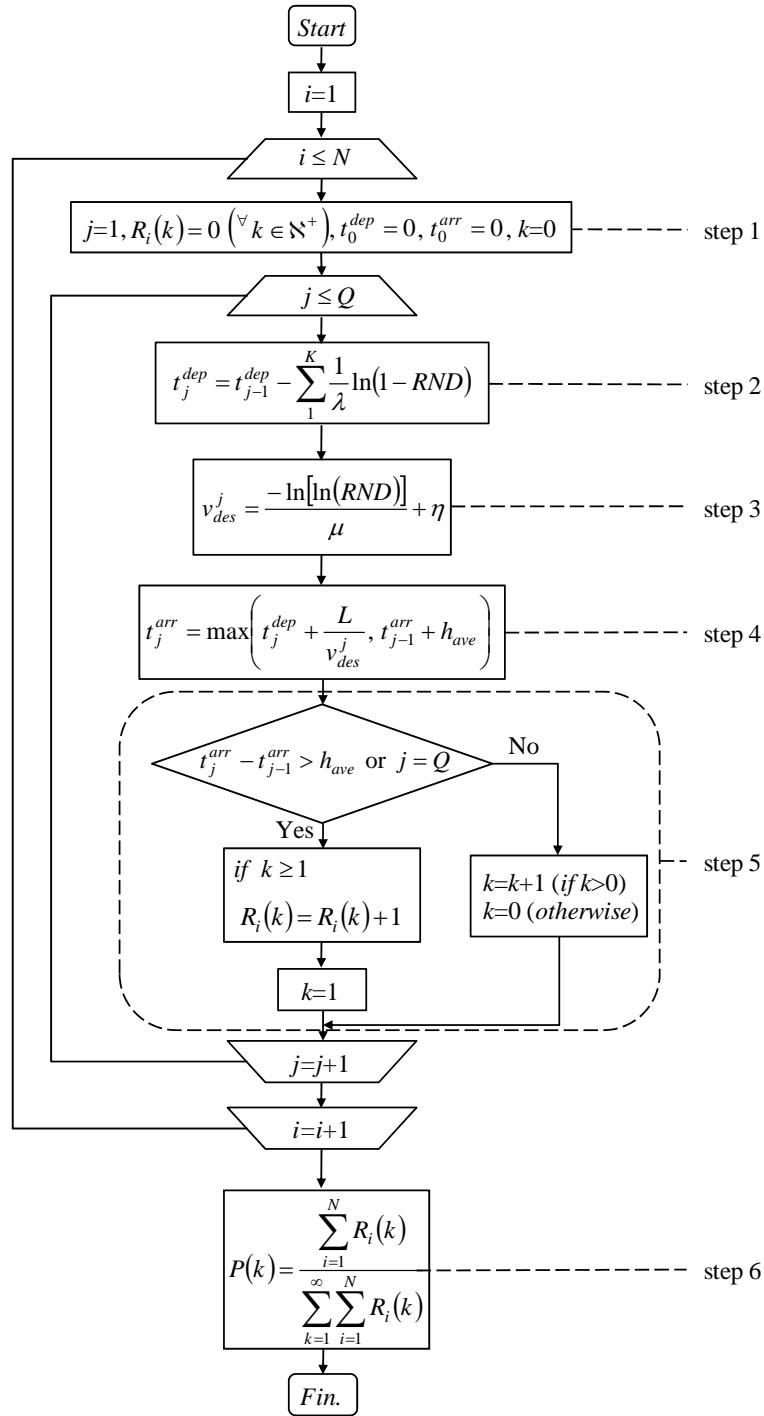
ただし， K はアーラン分布の位相を表し ($K=1$ or 2)， RND は0-1の間に一様分布する乱数， λ は流入交通量 Q [veh/h] の関係で，

$$\frac{1}{\lambda} = \frac{3600}{K \cdot Q} \quad (4.41)$$

と表されるパラメータをそれぞれ表す．その上で，車両 j の区間流入時刻を式(4.42)で与える．

$$t_j^{dep} = t_{j-1}^{dep} - \sum_{i=1}^K \frac{1}{\lambda} \ln(1 - RND) \quad (4.42)$$

- step 3 各車両に対し， $\beta=(90.7,0.097)$ のガンベル分布に従ってランダムに希望走行速度を与える．
- step 4 step 2 で算出した区間流入時刻に基づき，各車両の区間流出時刻 t_j^{arr} を決定する．
- step 5 step 4 から抽出されるすべての車群を車群台数で分類し， i 回目繰り返し計算時における台数 k の車群出現度数 $R_i(k)$ を集計する．



- | | |
|-------------|----------------------------------|
| i | : 繰り返し計算回数 ($i \leq N$) |
| j | : 各繰り返し計算時の発生車両台数 ($i \leq Q$) |
| k | : 車群台数 |
| $R_i(k)$ | : i 回目繰り返し計算時の車両台数 k の車群出現頻度 |
| t_j^{dep} | : 車両 j の区間流入時刻 |
| t_j^{arr} | : 車両 j の区間流出時刻 |
| v_{des}^j | : 車両 j の希望走行速度 |
| μ, η | : 希望走行速度分布パラメータ |
| L | : 対象片側1車線区間長 |
| h_f | : 追従走行時の車頭時間 |

図 4.14 アーラン分布仮定時の車群台数分布計算フロー

step 6 step 1～5 の所作を，乱数列を変えて N 回繰り返し行い，近似的に k 台の車群が出現する期待度数 $P(k)$ を式(4.39)にて算出，同期待度数の分布を以て車群台数分布とする．

4.6.2 車群台数分布の推定結果

繰り返し計算回数 N を 10,000 とし，各ケースについて車群台数分布を算出した．その結果と実観測によって得られた車群台数相対度数分布を併せて図 4.15～図 4.17 に示す．また，表 4.5～表 4.7 には，推定車群台数分布を車群台数分布の理論値とし，観測によって得られた車群台数分布への適合度検定を行った結果を示す．

表 4.5～表 4.7 から読み取れるように，区間始点への車両到着パターンに一樣到着を仮定したケースを除いては，交通量の多少によらず十分な精度で車群台数分布が推定された．一樣到着を仮定したケースでは， $Q=657[\text{veh/h}]$ のときは車群台数 3～4 台で過大，5 台超で過小に，一方 $Q=1,123[\text{veh/h}]$ のときは車群台数 6～9 台で過大，10 台超で過小となる推定結果を示した（図 4.15 参照）．これは以下の理由によるものと考えられる．すなわち，実現象下では，すでに車群を形成して到着するなど区間始点到着時の車頭時間がばらつくことで大きい車群が形成されやすい．対して，到着にばらつきのない一樣到着のケースでは，大きい車群の発生頻度を過小評価することとなる．さらに，その過小評価の結果，相対的に中程度の台数の車群発生頻度が過大に評価されたものと考えられる．

次に，アーラン到着を仮定した場合の推定結果（図 4.16，図 4.17 参照）に着目する．車群台数 1 台の単独自由走行車両の発生頻度推定結果を見ると，位相 1,2 の両ケースとも， $Q=1,123[\text{veh/h}]$ 時には比較的正確な推定， $Q=657[\text{veh/h}]$ 時には過小推定となっている．この原因として，アーラン到着を仮定した場合には，大きい車頭時間を持って区間始点に到着する車両の存在が過小評価されていることが挙げられる．以下，具体的に区間流入部地点 A における車頭時間 20.0 秒以上の車両の存在割合に着目すると， $Q=1,123[\text{veh/h}]$ の時，実観測約 0.7% に対し，アーラン到着 $K=1$ のとき 0.2%， $K=2$ のとき 0.005% と比較的その乖離は小さかった．一方， $Q=657[\text{veh/h}]$ の時，実観測約 3.8% であつたのに対し，アーラン到着では $K=1$ のとき 2.6%， $K=2$ のとき 0.52% となりその乖離は大きかった．すなわち，実現象下において，希望走行速度の高い車両が長い車頭時間を持って流入した場合，地点 B で単独走行車両として観測されるのに対し，アーラン到着ではその状況が生じにくいため，単独走行車両の割合を過小評価したものと考えられる．

以上より，推定の際の仮定に応じて，それぞれ推定結果に多少のバラツキは存在するものの，アーラン到着を仮定することにより，交通量レベルによらず高精度に車群台数分布の推定が可能であることが示された．

4.7 結語

本章では，車両間の希望走行速度の差異によって車群が形成されるという視座の下，追越しが制限される一定長の高速道路片側 1 車線区間での車群形成過程をモデル化した．そ

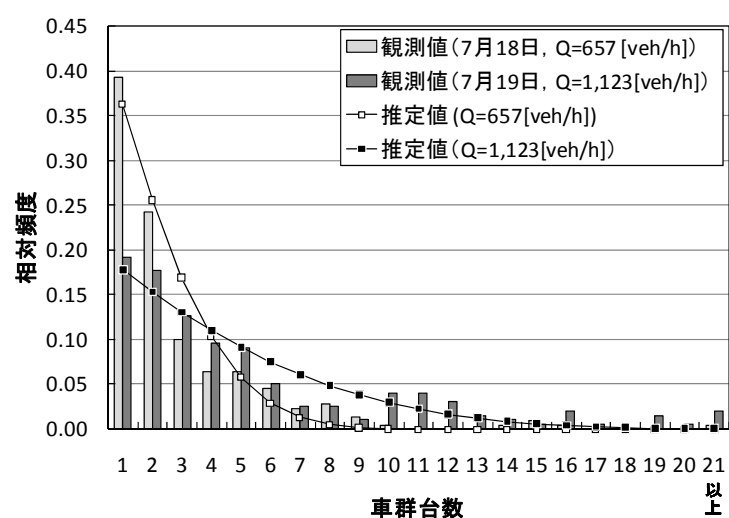


図 4.15 車群台数分布推定結果（一様到着）

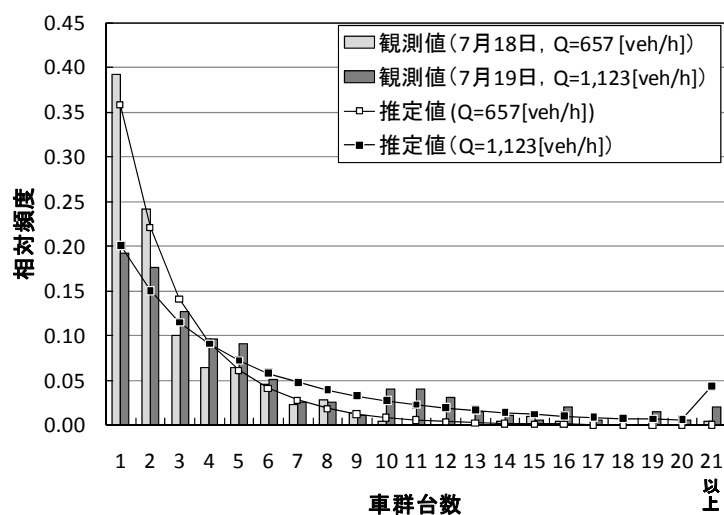


図 4.16 車群台数分布推定結果（アーラン到着 ($K=1$))

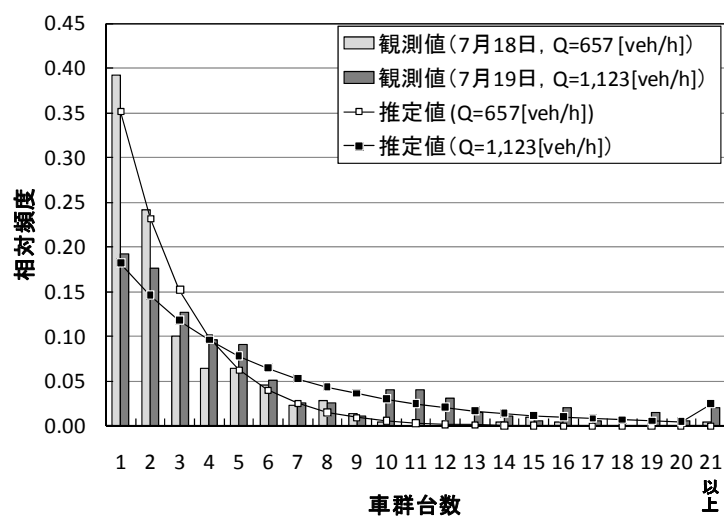


図 4.17 車群台数分布推定結果（アーラン到着 ($K=2$))

表 4.5 車群台数分布推定値適合度検定（一様到着）

7月18日 (Q=657[veh/h])					7月19日 (Q=1,123[veh/h])				
級	車群台数区分	観測値 n	推定値 m	$(n-m)^2/m$	級	車群台数区分	観測値 n	推定値 m	$(n-m)^2/m$
1	1	86	81.38	0.26	1	1	38	35.28	0.21
2	2	53	56.78	0.25	2	2	35	30.38	0.70
3	3	22	36.91	6.02	3	3	25	25.89	0.03
4	4	14	22.08	2.96	4	4	19	21.82	0.36
5	5	14	12.02	0.33	5	5	18	18.17	0.00
6	6-	30	9.84	41.32	6	6	10	14.93	1.63
					7	7	5	12.11	4.18
					8	8	5	9.69	2.27
					9	9	2	7.64	4.16
					10	10	8	5.93	0.73
					11	11-12	14	7.92	4.67
					12	13-	19	8.24	14.03
		χ^2_0	51.14				χ^2_0	32.97	
		df	5				df	11	
		$\chi^2_{0.05, 5}$	11.07				$\chi^2_{0.05, 11}$	19.68	

表 4.6 車群台数分布推定値適合度検定（アーラン到着（ $K=1$ ））

7月18日 (Q=657[veh/h])					7月19日 (Q=1,123[veh/h])				
級	車群台数区分	観測値 n	推定値 m	$(n-m)^2/m$	級	車群台数区分	観測値 n	推定値 m	$(n-m)^2/m$
1	1	86	78.25	0.77	1	1	38	39.81	0.08
2	2	53	48.40	0.44	2	2	35	29.69	0.95
3	3	22	30.91	2.57	3	3	25	22.71	0.23
4	4	14	20.28	1.95	4	4	19	17.92	0.06
5	5	14	13.39	0.03	5	5	18	14.30	0.96
6	6	10	8.95	0.12	6	6	10	11.53	0.20
7	7	5	6.04	0.18	7	7	5	9.46	2.10
8	8-9	9	6.80	0.71	8	8	5	7.77	0.99
9	10-	6	5.97	0.00	9	9	2	6.43	3.05
					10	10	8	5.37	1.29
					11	11-12	14	8.34	3.84
					12	13-14	5	5.99	0.16
					13	15-17	6	6.14	0.00
					14	18-22	4	5.83	0.58
					15	23-	4	6.70	1.09
		χ^2_0	6.76				χ^2_0	15.59	
		df	8				df	14	
		$\chi^2_{0.05, 8}$	15.51				$\chi^2_{0.05, 14}$	23.68	

表 4.7 車群台数分布推定値適合度検定（アーラン到着（ $K=2$ ））

7月18日 (Q=657[veh/h])					7月19日 (Q=1,123[veh/h])				
級	車群台数区分	観測値 n	推定値 m	$(n-m)^2/m$	級	車群台数区分	観測値 n	推定値 m	$(n-m)^2/m$
1	1	86	76.98	1.06	1	1	38	36.03	0.11
2	2	53	50.76	0.10	2	2	35	28.82	1.33
3	3	22	33.34	3.86	3	3	25	23.32	0.12
4	4	14	21.59	2.67	4	4	19	19.05	0.00
5	5	14	13.76	0.00	5	5	18	15.55	0.39
6	6	10	8.70	0.19	6	6	10	12.81	0.62
7	7	5	5.46	0.04	7	7	5	10.53	2.91
8	8-	15	8.39	5.20	8	8	5	8.71	1.58
					9	9	2	7.21	3.77
					10	10	8	5.95	0.71
					11	11-12	14	9.12	2.61
					12	13-14	5	6.29	0.27
					13	15-17	6	6.04	0.00
					14	18-	8	8.55	0.04
χ_0^2		13.12			χ_0^2		14.43		
df		7			df		13		
$\chi_{0.05, 8}^2$		14.07			$\chi_{0.05, 14}^2$		22.36		

の上で、片側1車線区間終点で観測される車群台数分布を推定する手法、及び車群が含まれる一般の交通流観測に基づいて希望走行速度分布を推定する手法を構築した。

まず、構築した希望走行速度分布推定手法を東海北陸自動車道片側1車線区間において同交通条件下で観測された交通量レベルの異なる交通流データに適用した。その結果、本研究で提案した手法を用いることにより、交通量レベルによらずほぼ同一の希望走行速度分布が推定された。これは用いたデータが交通量レベルは異なるものの、ほぼ同じ交通条件下での交通流下で観測された取得されたものであり、交通流を構成する車両群の走行特性に大きな差はないことを勘案すると、極めて妥当な結果であるといえる。

次に、推定された希望走行速度分布を入力として区間終点で観測される車群台数分布を推定し、その推定精度の検証を行った。その結果、区間始点到着時の車頭時間分布にアーラン分布を採用することで、交通量レベルによらず的確に車群台数分布の推定が可能であることを示した。

今後は、本研究で提案した推定手法の適用事例を増やし、より詳細に推定精度の検証を行う必要がある。また、本研究では片側1車線区間のみを対象としたが、多車線区間における車群形成過程を表現するモデルへと拡張を進める予定である。

第4章 参考文献

- 1) 喜多秀行, 前田伸幸: 道路交通における走行サービスの質とその計測: 効用アプローチに基づく方法, 土木学会論文集 No.772, IV-65, pp.3-10, 2004.
- 2) Lamm, R, *et al.*: Highway design and traffic safety engineering handbook, McGraw-Hill, New York, 1999.
- 3) National Research Council: Highway Capacity Manual 2000, Transportation Research Board Special Report 209, TRB, 2000.
- 4) 越正毅: 高速道路のボトルネック容量, 土木学会論文集, No.371/4-5, pp.1-7, 1986.
- 5) 佐野可寸志, 松本昌二, 成田純友: 高速道路の追越車線における車両挙動の分析, 第20回交通工学研究発表会論文報告集, pp.239-244, 2001.
- 6) Branston, D.: A method of estimating the free speed distribution for a road, Transportation Science 13(2) pp.130-145, 1979.
- 7) Botma, H. and P. Bovy: Free speed distribution at arterial highways: estimation approaches, The Proceedings of 9th WCTR Conference in Korea, 2001.
- 8) Hoogendoorn, S.P.: Unified approach to estimating free speed distributions, Transportation Research Part B, Vol.39 pp.709-727, 2005.
- 9) Buckley, D.: A semi-Poisson model of traffic flow, Transportation Science 2(2), p.107-132, 1968.
- 10) Kaplan, E.L. and P. Meier: Nonparametric Estimation from Incomplete Observations, Journal of the American Statistical Association, Vol. 53, No. 282, pp. 457-481, 1958.
- 11) 中村美保子, 喜多秀行: 追従車の存在を考慮した自由走行速度分布の推定法, 土木計画学研究・講演集 CD-ROM, Vol.26, 2002.
- 12) Taylor, M.A.P., A.J. Miller and K.W. Ogden: A comparison of some bunching models for rural traffic flow, Transportation Research, Vol.8, pp.1-9, 1974
- 13) Galin, D.: A comparison of some bunch-size models for two-lane rural roads – An Israeli experience, Transportation Research, Vol.14, pp.51-56, 1980.
- 14) Taweasilp, S., I. Okura and F. Nakamura: Study of platoon characteristics on a multi-lane expressway, Journal of Infrastructure Planning Review, Vol.18, No.5, pp.909-917, 2001.
- 15) Miller, A.J.: A queuing model for road traffic flow, Journal of the Royal Statistical Society, Series B, Vol. 23, pp.64-75, 1961.
- 16) Tanner, J.C.: Delays on a two-lane road, Journal of the Royal Statistical Society, Series B, Vol. 23, pp.38-63, 1961.
- 17) Haight, F.A. and M.A. Breuer: The borel-Tanner distribution, Biometrika, Vol.47, No.1/2, pp.143-150, 1960.

- 18) Tamura, Y. and T. Chisyaki: Modeling and study of speed and bunch distributions considering fluctuations of traffic flow, Proceedings of the 10th International Symposium on Transportation and Traffic Theory, pp.99-119, 1987.
- 19) 田村洋一，樗木武，三野定：交通流の基本速度分布モデルおよび実際速度分布モデルの構築に関する研究，土木学会論文集，第 377 号/IV-6，pp.127-135，1987.

第5章 ボトルネック通過時の車両走行特性の把握

5.1 概説

高速道路単路部ボトルネックの渋滞発生要因として、越¹⁾は車群がボトルネック通過時に生じる減速波が増幅伝播し、渋滞流に至ることを指摘している。また、ボトルネック上流側に付加車線を設置しボトルネックに流入する車群を分散させることで渋滞を抑制する効果があることなど、渋滞発生と車群の関係性を指摘する研究も多い²⁾³⁾⁴⁾⁵⁾。

その一方で、車群に関する既往研究では車群台数分布の推定や交通量と車群台数分布の関係を求めるものは多いものの、車群として走行する車両の走行特性を把握したものは少なく、車群と渋滞の関係については明らかとなっていない。石田ら⁶⁾は車群中車両の走行特性として、交通量が高い場合は前車の車頭時間が大きいと後車の車頭時間が小さくなる傾向にあることを指摘している。また、先行研究⁷⁾では、暫定2車線高速道路の片側1車線区間で形成される車群に着目し、車群中後方に位置する車両の車頭時間は前方に位置する車両の車頭時間と比較して大きくなる傾向があることを明らかにした。さらにこの知見を踏まえ、車群中後方の車頭時間の長い車両がある一定時間以上継続してボトルネックを通過する状態を渋滞と定義し、流入交通流率と渋滞発生確率の関係をモデル化している。しかし、渋滞発生時の速度低下現象と車群の関係性については明らかにされていない。

そこで本章では、高速道路単路区間で観測された交通流パルスデータに基づき、車群内での車両走行速度の遷移過程特性を明らかにする。さらに、ボトルネック上流地点で得られたデータと下流地点で得られたデータを比較することで、ボトルネックの存在が車両走行特性に与える影響を把握する。

5.2 データの概要

5.2.1 データの取得

車群として走行する車両の走行特性を把握するにあたり、第3章で詳述した東北道下り線 91.8kp～95.8kp で取得された交通流パルスデータを用いる。当該区間は鹿沼 IC の下流約 4.0km に位置し、93.8kp～94.4kp がサグの最底部となる。車両感知器は、当該区間中 91.8kp 地点、92.6kp 地点、93.2kp 地点、93.6kp 地点、94.0kp 地点、94.4kp 地点、95.0kp 地点、95.8kp 地点の走行車線、及び追越車線に設置され、各地点で車両一台一台の地点通過時刻、車種、速度、車長、車頭間隔、車頭時間が取得されている。交通流観測は 1994 年 12 月 26 日～1995 年 1 月 9 日、1995 年 4 月 22 日～5 月 7 日、1995 年 8 月 9 日～8 月 22 日の計 46 日間行われた。本分析では、観測交通状況を同一とするため、降雨の無い昼間時間帯に観測されたデータのみを対象とする。そこで、観測期間中、降雨の観測された 95 年 1 月 4 日、4 月 26 日、5 月 1 日、8 月 10 日、13 日、16 日、22 日のデータは解析対象外とした。ただし、12 月、1 月に観測されたデータに関しては 8:00～16:00 を、4 月、5 月、8 月に観測されたデ

ータに関しては 7:00～17:30 を昼間時間帯と定義した。

5.2.2 ボトルネックの特定

本研究では、自由流状態から渋滞が発生するまでの交通流を対象とし、ボトルネック区間の上流と下流での車両挙動の差異を分析することを目的とする。そこで、本節では交通流パルスデータに基づき、対象区間におけるボトルネック地点を特定する。

まず、パルスデータを 5 分間間隔で集計し、観測地点、車線毎に 5 分間交通量[pcu/(5min・lane)], 及び 5 分間平均速度[km/h]を算出し、その関係を散布図上にプロットした。その結果を図 5.1.1～図 5.1.8 に示す。ただし、5 分間交通量の算出にあたり、大型車は 1.7pcu とした。また、5 分間平均速度 V_{5min} は 5 分間に観測された全車両の走行速度の調和平均とし、式(5.1)にて算出した。

$$V_{5min} = \frac{N}{\sum_{i=1}^N \frac{1}{v_i}} \quad (5.1)$$

ここで、 N は各感知器で 5 分間に観測された車両台数を、 v_i は観測された車両の走行速度を示す。図より、各観測地点でも平均速度の高い自由流領域とその低い渋滞流領域が観測され、走行車線では約 70.0[km/h]以上、追越車線では約 90.0[km/h]以上が自由流状態にあり、さらに走行車線、追越車線共に約 50.0[km/h]以下で渋滞流状態になることが分かる。さらに、この 5 分間交通量－5 分間平均速度の関係を地点毎に見ると、94.4kp 地点では 50.0[km/h]～60.0[km/h]の領域に、95.0kp 地点では 50.0[km/h]～70.0[km/h]の領域に、95.8kp 地点では 70.0[km/h]～90.0[km/h]の領域に、自由流にも渋滞流にも属さないプロット集合が存在するのが確認できる（図中矢印箇所参照）。これは、93.8kp～94.4kp を最底部とするサグの影響で車両走行速度が低下した後、速度を回復しつつある状況がプロットされたものと考えられる。

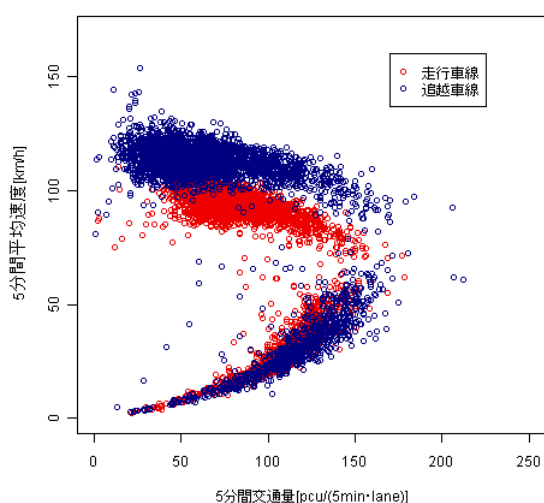


図 5.1.1 91.8kp 地点 QV 関係

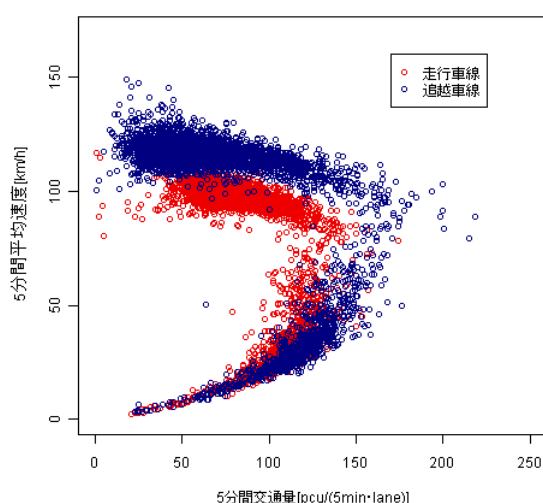


図 5.1.2 92.6kp 地点 QV 関係

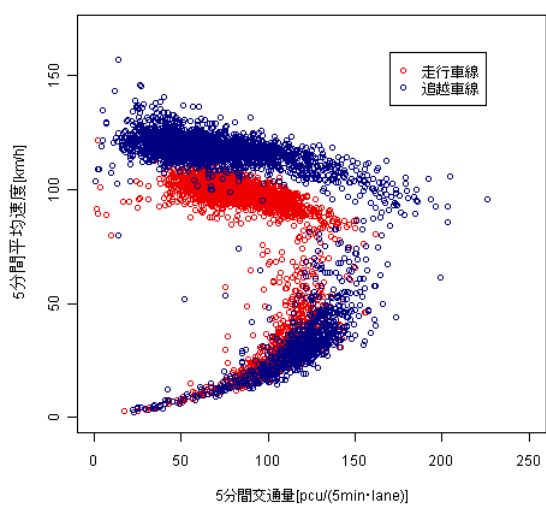


図 5.1.3 93.2kp 地点 QV 関係

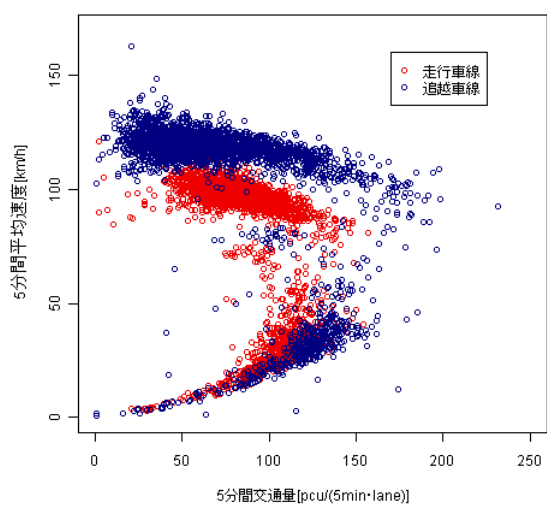


図 5.1.4 93.6kp 地点 QV 関係

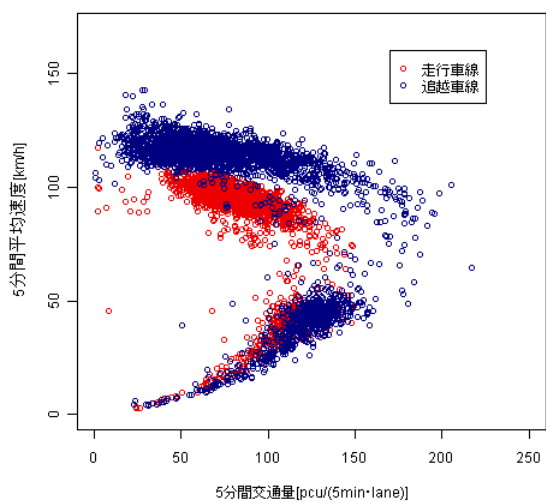


図 5.1.5 94.0kp 地点 QV 関係

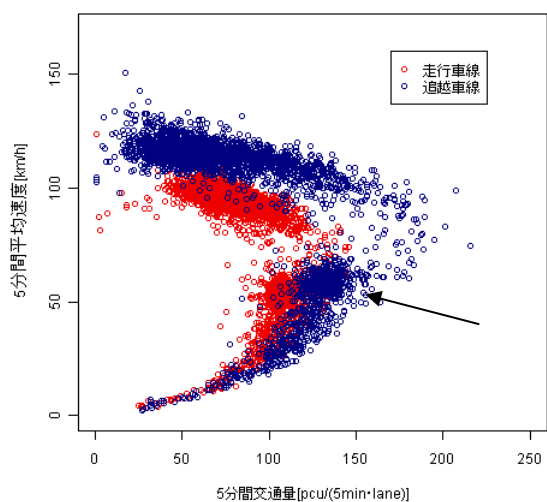


図 5.1.6 94.4kp 地点 QV 関係

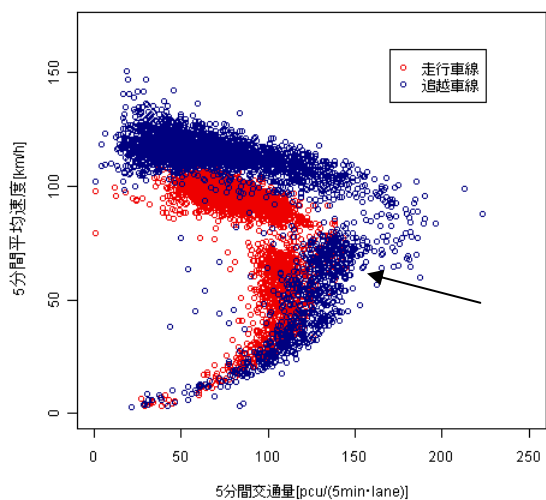


図 5.1.7 95.0kp 地点 QV 関係

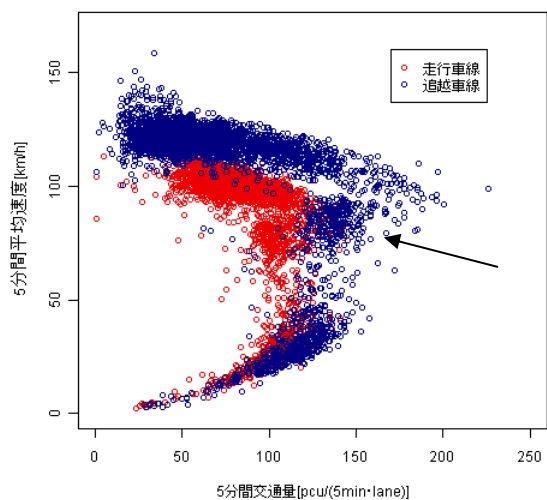


図 5.1.8 95.8kp 地点 QV 関係

この現象を詳細に確認し、対象区間内でのボトルネック地点を明確に特定するため、観測期間中渋滞が発生した 1994 年 12 月 29 日～31 日、1995 年 4 月 29 日、5 月 3 日～5 日、8 月 10 日～20 日の計 18 日について、観測地点毎に 6 時～19 時までの 5 分間平均速度を算出し、走行速度コンター図を作成した。ただし、5 分間平均速度水準は(1) 100[km/h]以上、(2) 80[km/h]以上 100[km/h]未満、(3) 60[km/h]以上 80[km/h]未満、(4) 40[km/h]以上 60[km/h]未満、(5) 40[km/h]未満の 5 段階に分類した。その結果を図 5.2.1～図 5.2.15 に示す。

図より、各日とも概ね 94.0kp 付近から減速が開始され渋滞が発生し、その後速度の低下した渋滞流状態が上流側へ伝播していること、さらに、渋滞発生後は 93.6kp 地点付近が渋滞の先頭となり、同地点より下流側では速度が回復する傾向にあることが確認できる。しかし、1994 年 12 月 30 日、31 日、1995 年 5 月 5 日、8 月 11 日、18 日、20 日の交通状況に着目すると、走行速度の減速波が観測対象区間の下流から伝播していることが確認できる。これは何らかのきっかけで対象区間の下流側のボトルネックが顕在化し、その地点を先頭として渋滞が発生、上流側へ伝播したと考えられる。

以上の結果より、対象区間内では 93.6kp～94.0kp にかけてボトルネックが存在すると判断する。ただし、本研究では自由流状態から渋滞が発生するまでの交通流を対象とし、ボトルネック区間の上流側と下流側での車両挙動の差異を分析することを目的とする。そのため以下の解析では、観測対象区間より下流地点がボトルネックとなって渋滞が発生した 1994 年 12 月 30 日、31 日、1995 年 5 月 5 日、8 月 11 日、18 日、20 日は解析対象から除外する。

5.3 渋滞発生時の車両挙動

本節では、取得された交通流パルスデータに基づいて渋滞が発生する直前の車両走行状態を分析し、渋滞発生メカニズムについての仮説を指定する。

5.3.1 渋滞発生時の車線利用率

高速道路片側 2 車線以上の単路区間で発生する渋滞について、交通量が多くなると車線利用率が内側車線（追越車線）に偏り、内側車線で形成される高密度で大きい車群内で減速波が発生、伝播することにより渋滞が発生することが指摘されている⁸⁾。このことに関して、対象区間の各地点での 5 分間平均速度－5 分間交通量－追越車線利用率の関係を図 5.3.1～図 5.3.8 に示す。ただし、追越車線利用率は、大型車の乗用車換算係数を 1.7[pcu]として、各観測地点で走行車線、追越車線で観測された 5 分間交通量[pcu/(5min・2lane)]に対する、追越車線の感知器で観測された 5 分間交通量[pcu/(5min・2lane)]の割合を表す。

これより、いずれの観測地点でも交通量レベルが高く、5 分間平均速度が 100[km/h]より低下しつつある状況では追越車線利用率が 0.5 を超えることが確認できる。また、平均走行速度がさらに低下し、渋滞状態に遷移するに従って、追越車線利用率も低下し最終的にほぼ 0.5 に至ることがわかる。

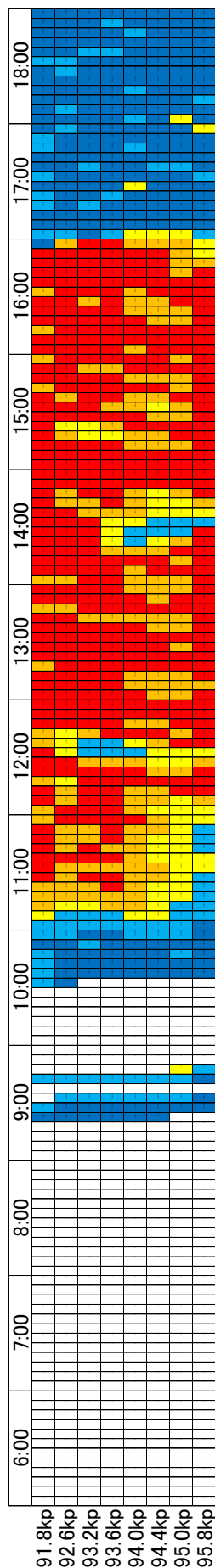


図5.2.1 1994年12月29日 走行速度コンタ―図

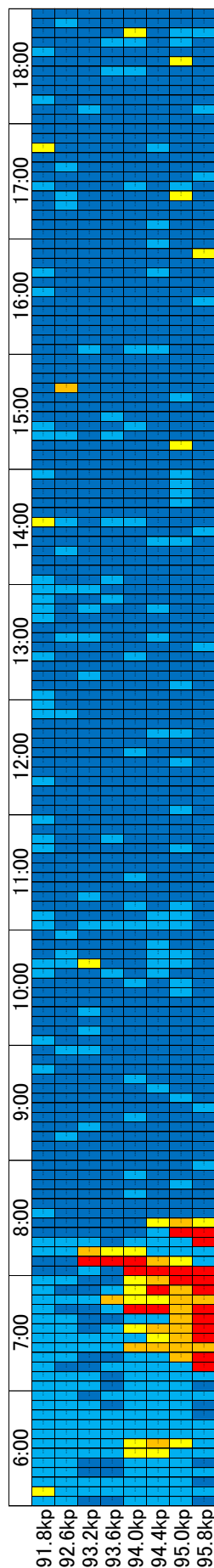


図5.2.2 1994年12月30日 走行速度コンタ―図

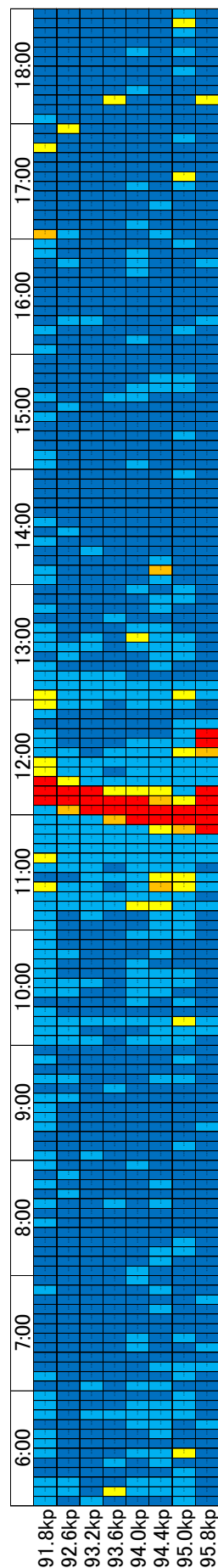


図5.2.3 1994年12月31日 走行速度コンタ―図



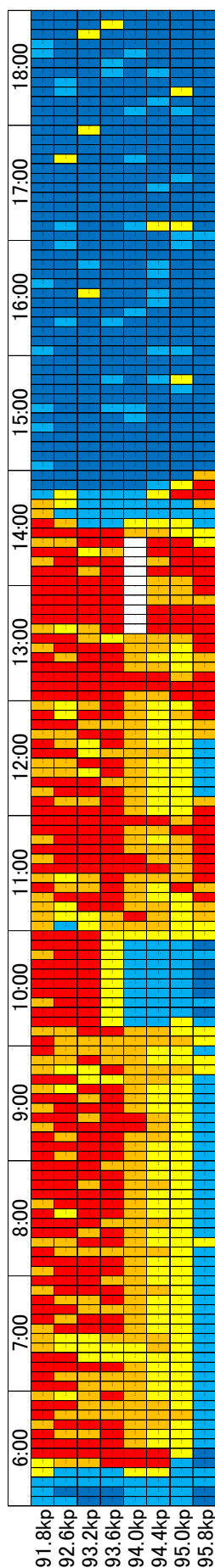


図5. 2. 4 1995年4月29日 走行速度カウンター図

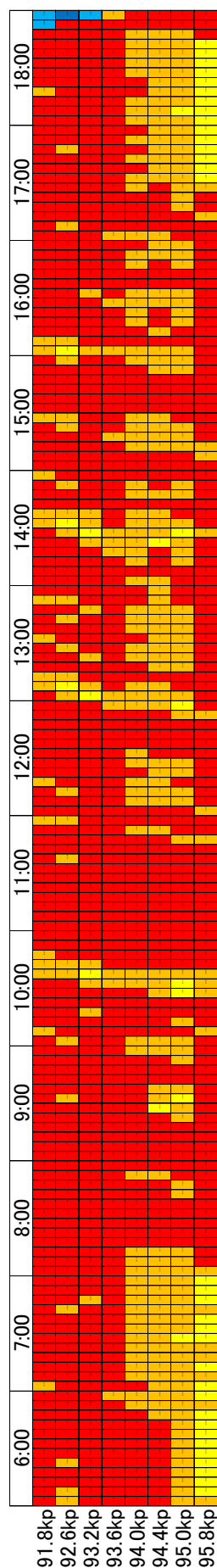


図5. 2. 5 1995年5月3日 走行速度カウンター図

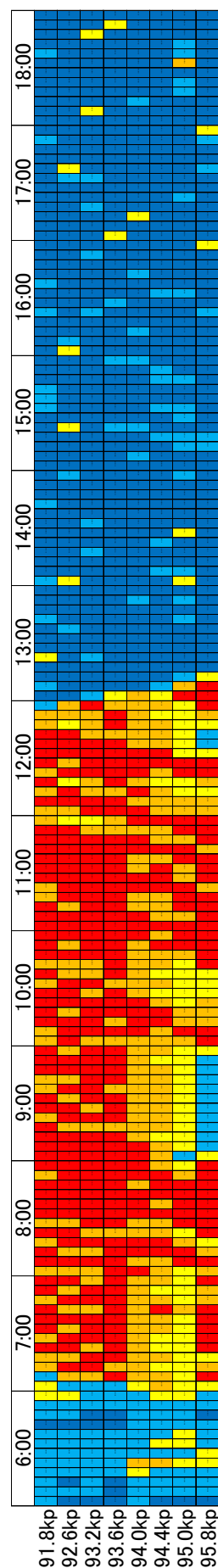


図5. 2. 6 1995年5月4日 走行速度カウンター図



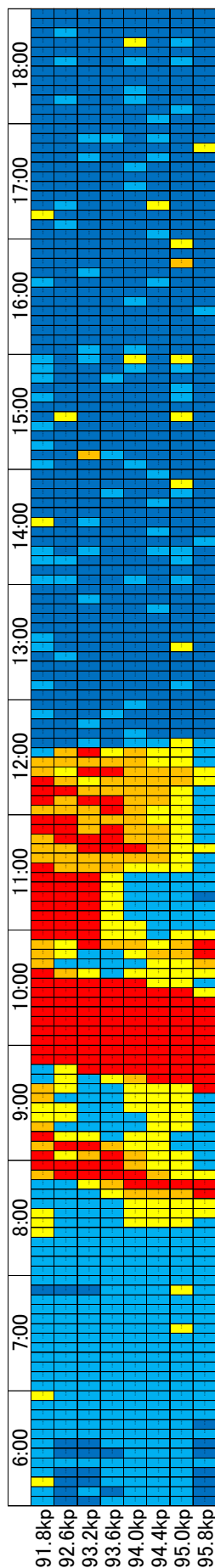


図5.2.7 1995年5月5日 走行速度コンタ―図

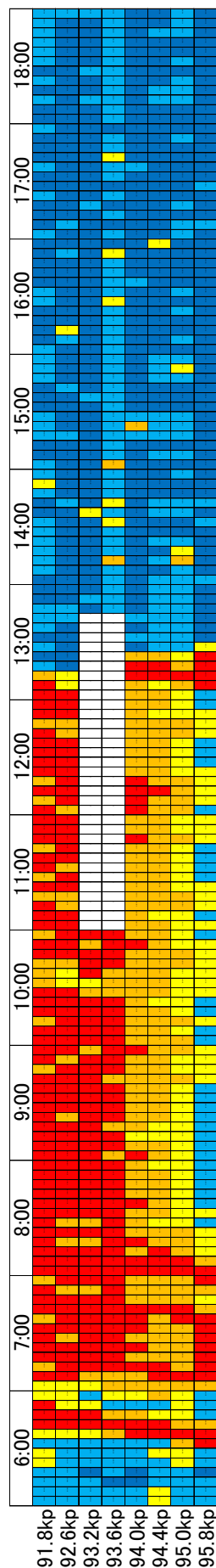


図5.2.8 1995年8月11日 走行速度コンタ―図

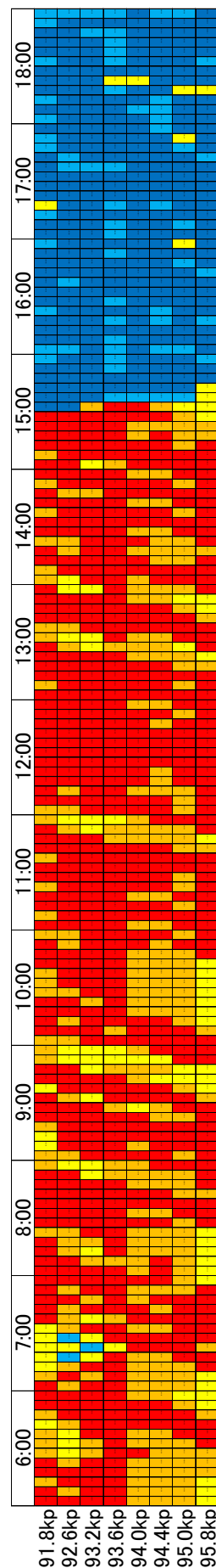


図5.2.9 1995年8月12日 走行速度コンタ―図



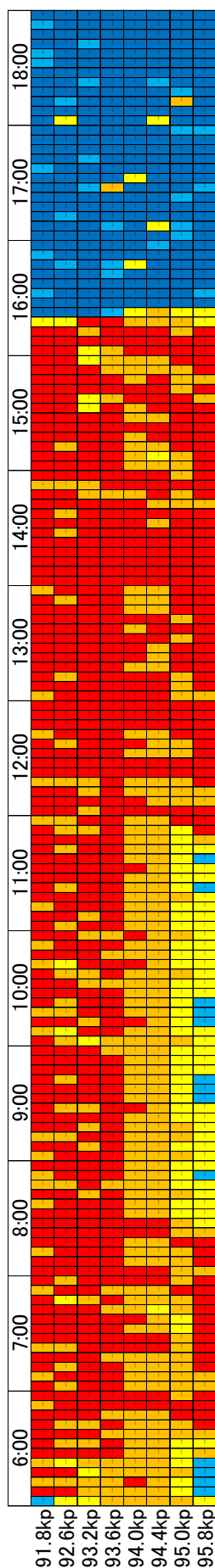


図5.2.10 1995年8月14日 走行速度コンタ―図

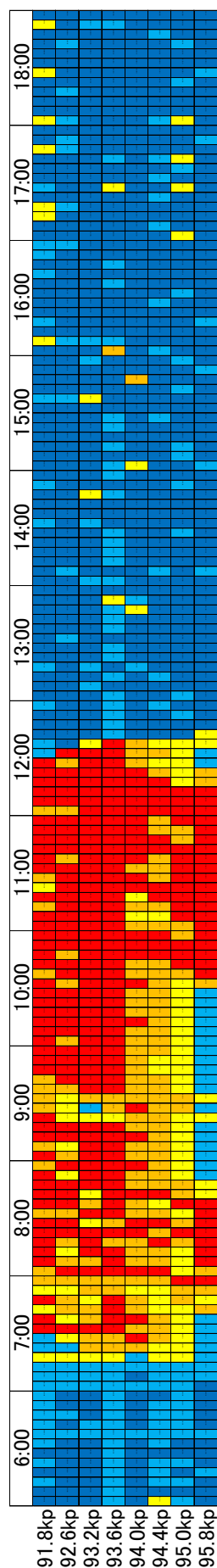


図5.2.11 1995年8月15日 走行速度コンタ―図

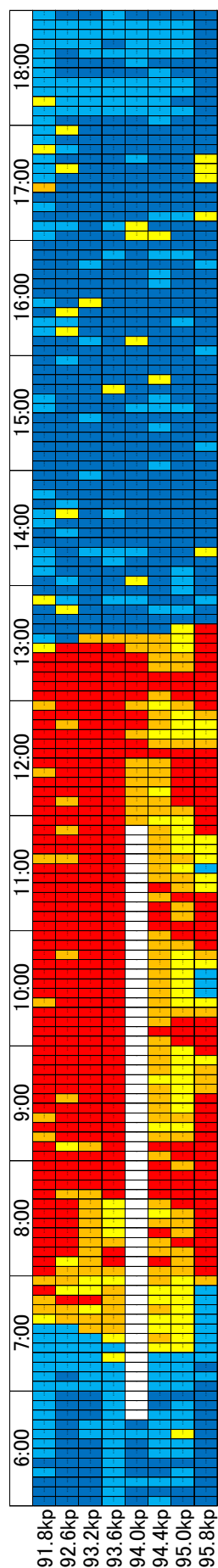


図5.2.12 1995年8月17日 走行速度コンタ―図



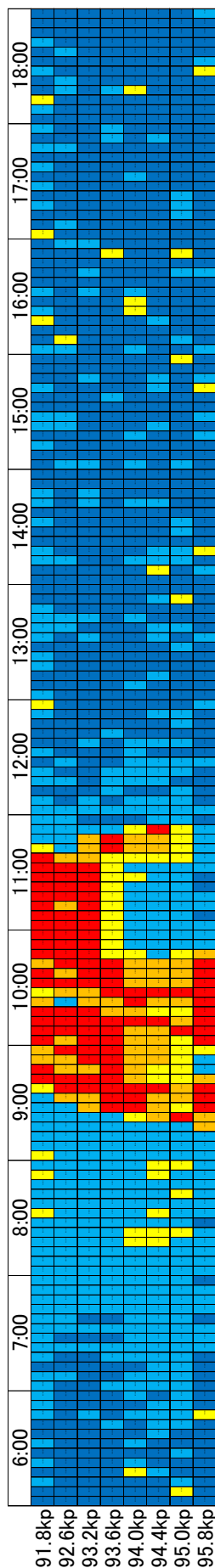


図5.2.13 1995年8月18日 走行速度コンター図

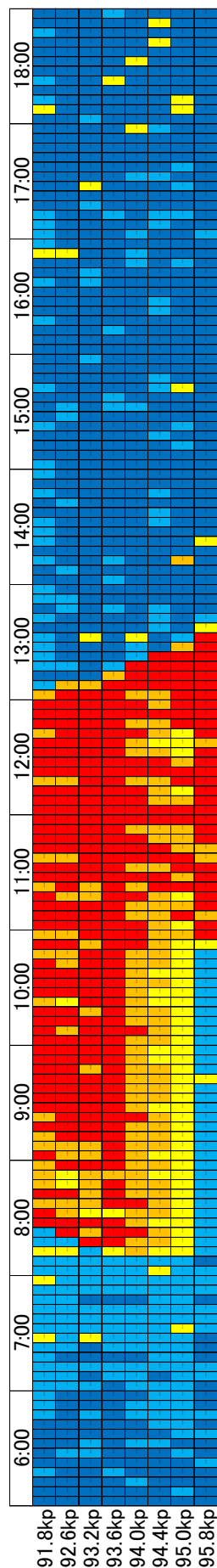


図5.2.14 1995年8月19日 走行速度コンター図

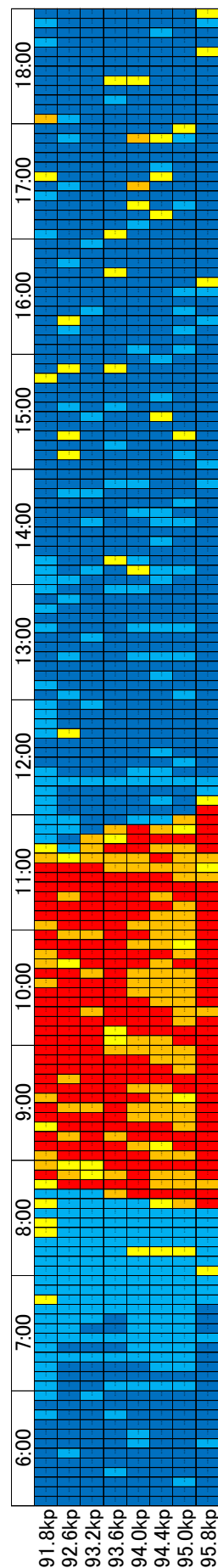


図5.2.15 1995年8月20日 走行速度コンター図



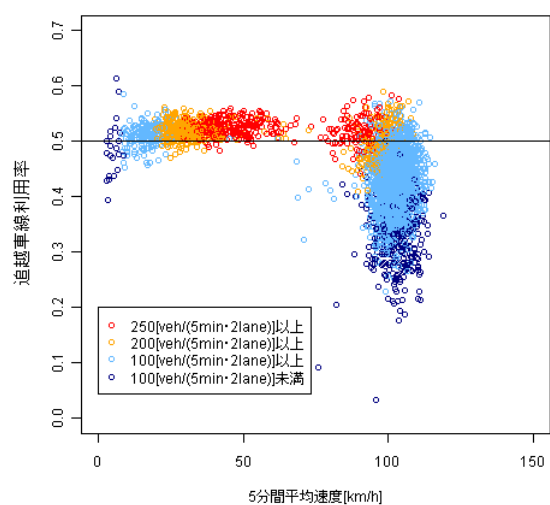


図 5.3.1 91.8kp 地点追越車線利用率

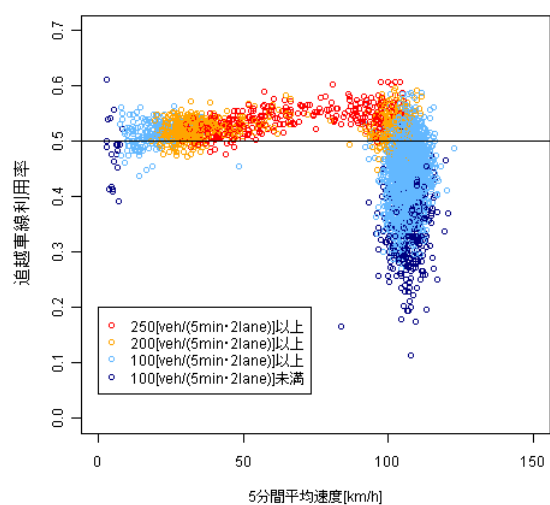


図 5.3.2 92.6kp 地点追越車線利用率

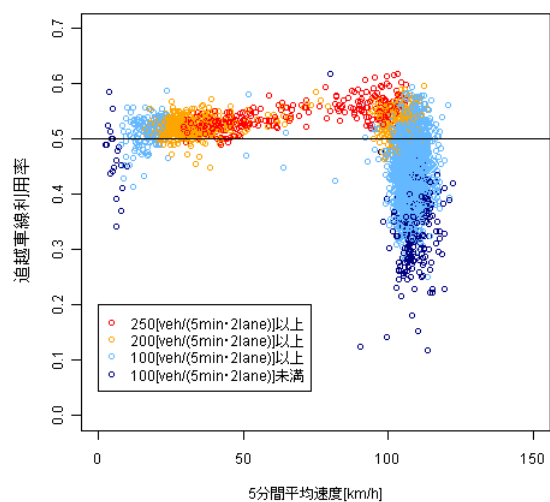


図 5.3.3 93.2kp 地点追越車線利用率

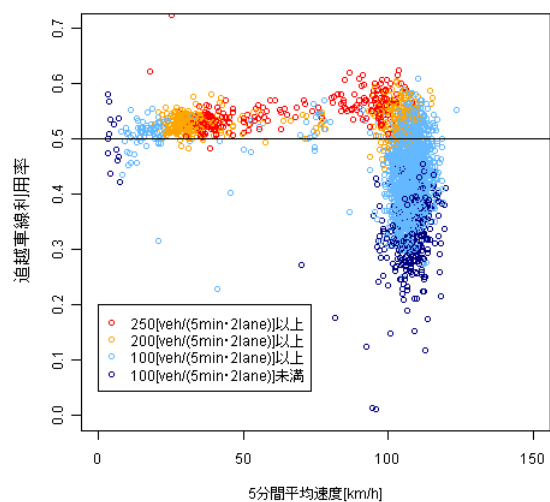


図 5.3.4 93.6kp 地点追越車線利用率

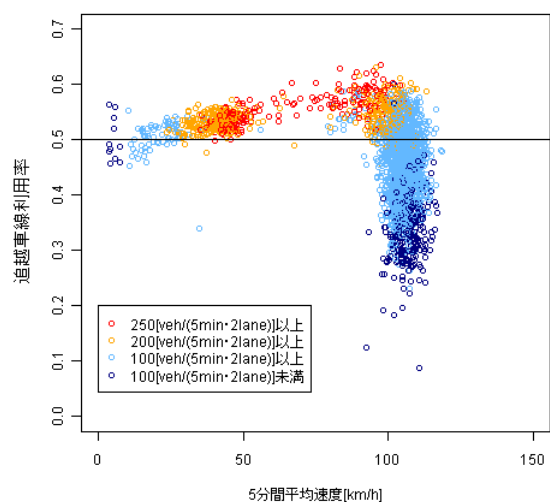


図 5.3.5 94.0kp 地点追越車線利用率

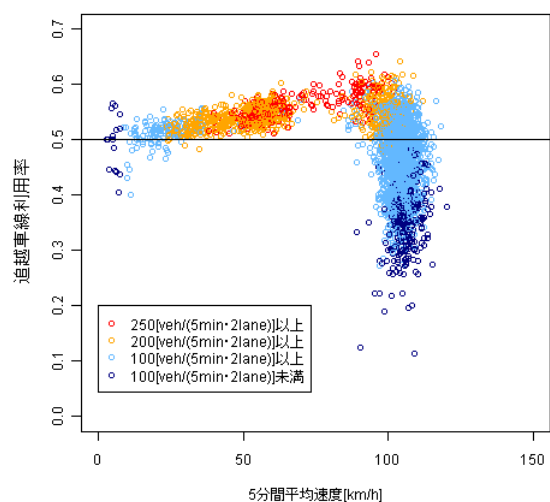


図 5.3.6 94.4kp 地点追越車線利用率

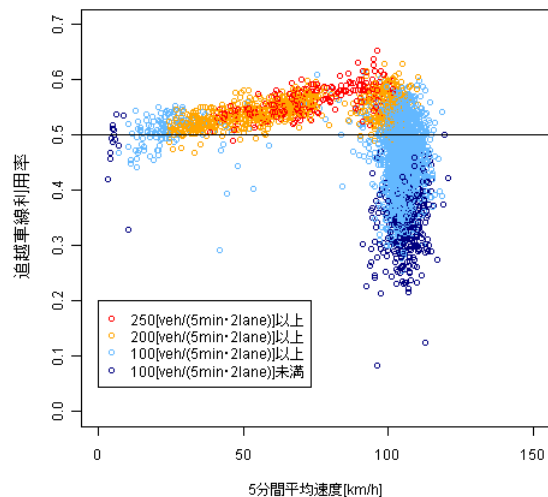


図 5.3.7 95.0kp 地点追越車線利用率

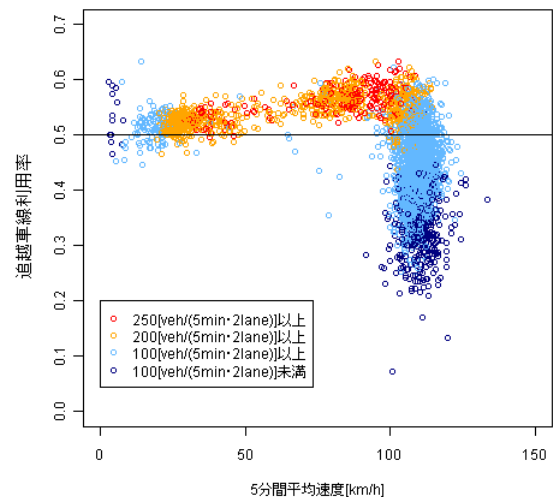


図 5.3.8 95.8kp 地点追越車線利用率

これより、自由流状態から渋滞流状態へ遷移する過程にある交通量レベルの高い状態では車線利用率が追越車線に偏る傾向にあることが確認された。そこで、本研究では、各観測地点の追越車線で得られた交通流パルスデータに焦点を絞り、渋滞発生時の車両挙動の解析を行う。

5.3.2 観測地点別の走行速度遷移状況

渋滞発生時の各車両の走行速度の遷移状況を確認するため、その一例として 1995 年 8 月 19 日の 8:00～8:30 にかけて各地点で観測された車両走行速度の遷移状況を図 5.4 に示す。図中、横軸は時刻を表し、縦軸は観測された車両の走行速度を表す。

図では、94.0kp で 8:10～8:15 にかけて発生したゆるやかな減速傾向（図中矢印）が上流側に減速度合いを強めながら伝播し、93.6kp 地点より上流では車両速度が 20.0[km/h]以下に低下、渋滞が発生している様子が描かれている。

連続する車両の走行速度遷移状況に着目すると、短い車頭時間で走行する車両であっても走行速度は大きく変動していることが確認できる。95.8kp 地点にみられるように渋滞の発生していない状況では、走行速度は変動しつつも、その変動の中心は 100[km/h]を維持している。しかし、94.0kp 地点の 8:10 以降の減速状況では、1 台の車両が大きく減速し、その後続の車両もそれに続いて減速、最終的に走行速度が 40.0[km/h]を中心として変動するようになり、渋滞流状態へと遷移している。

減速傾向にあるか、あるいは加速傾向にあるかは前方車両に対する後方車両の走行速度の大小、すなわち相対速度の正負に依存することとなる。そこで、相対速度を

$$\text{相対速度} = \text{後方車両走行速度} - \text{前方車両走行速度}$$

と定義した上で、図 5.5 に同時時間帯に観測された車両の相対速度遷移状況を表す。ただし、図中矢印は図 5.4 で観測される減速傾向にある車両と対応する車両を表す。

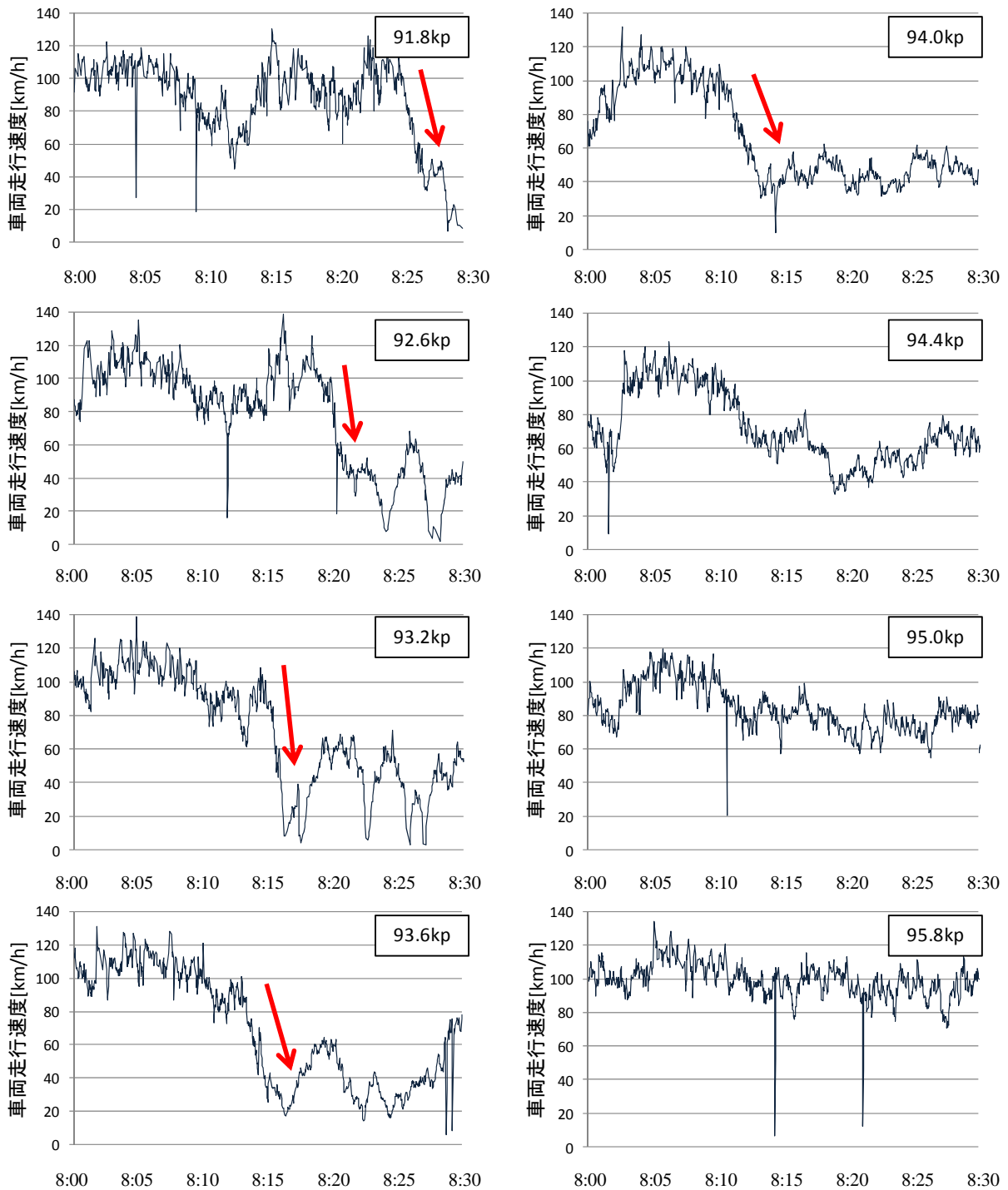


図 5.4 1995 年 8 月 19 日渋滞発生時の走行速度遷移状況

これより，相対速度の時系列的な変動は多少のばらつきはあるものの，自由流状態，渋滞流状態を問わず，0[km/h]を中心として変動していることが確認できる．

5.3.3 車群中車両走行速度遷移に関する仮説の措定

第 3 章の結果より，車頭時間が 4.0 秒より大きい自由走行車両はその前方車両速度との相関は小さいが，車群として走行する車頭時間が 4.0 秒以下の車両の走行速度は前方車両

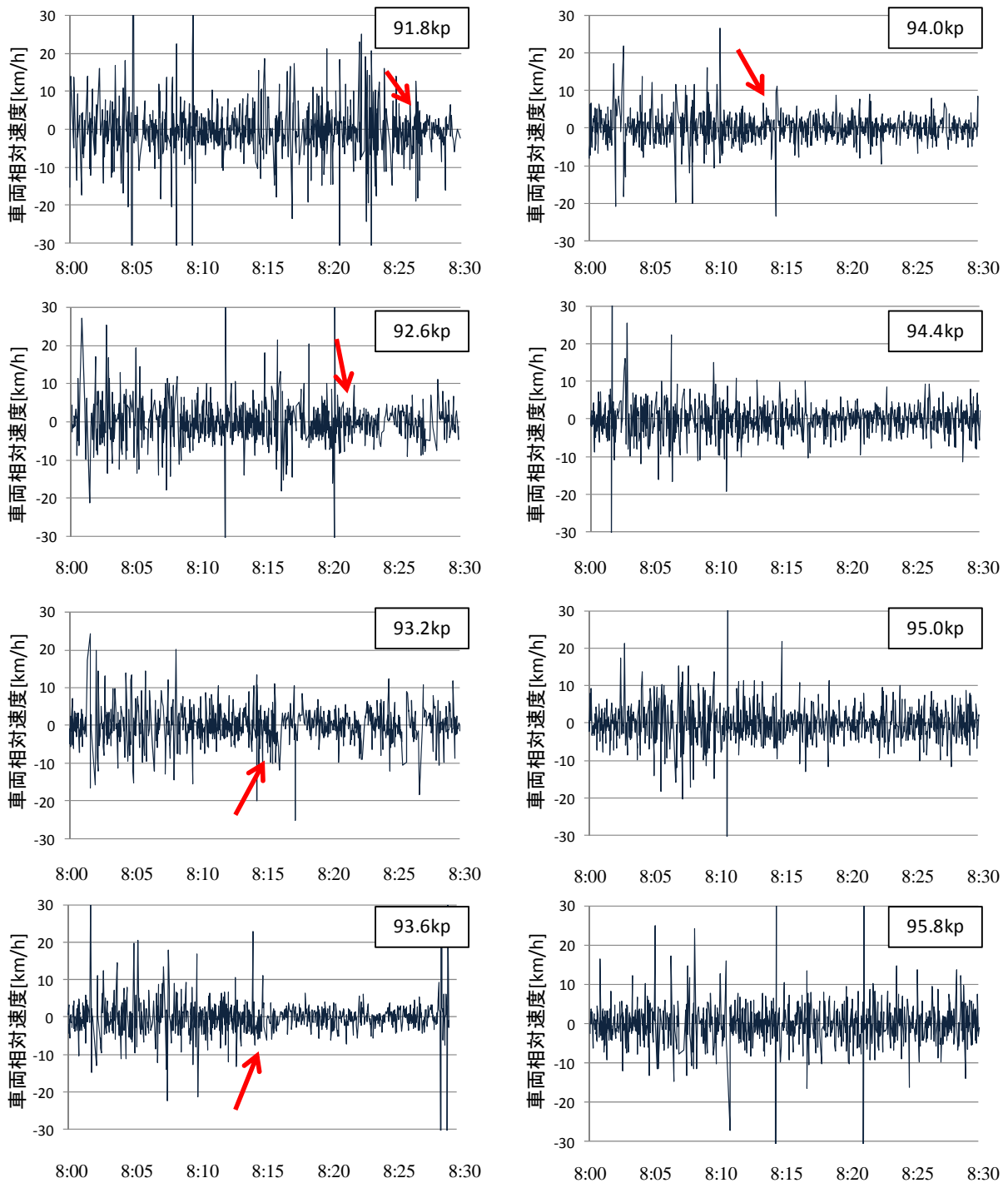


図 5.5 1995 年 8 月 19 日渋滞発生時の相対速度遷移状況

速度と強い相関があることが明らかとなっている。これは、車群中を走行する車両は前方車両に対して追従状態にあり、その走行挙動は前方車両挙動に強く影響を受けるためであると考えられる。追従走行中は前方車両の加減速に応じて、自らの走行速度を調整する。その結果、車両感知器では自車走行速度と前方車両走行速度の差として相対速度が観測される。

前方車両の走行速度が十分に高いとき、後方車両の希望走行速度が前方車両の走行速度

よりさらに高い確率は小さいため、観測される後方車両の走行速度は前方車両より低く負の相対速度が観測される傾向があると考えられる。その一方で、前方車両の走行速度が低いときは後方車両の希望走行速度が前方車両速度より高い確率が高く、正の相対速度が観測される傾向をもつことが考えられる。すなわち、観測される相対速度は前方車両速度に関連して確率的に決定されると予想される。さらに、図 5.5 に示した相対速度の遷移状況を鑑みると、連続する車両の相対速度には系列的な相関は見られず、確率的な変動を持つことが考えられる。

以上を踏まえ、本研究では車群中車両の走行速度遷移過程について、定点観測で取得される車群中 n 番目車両の走行速度 V_n を確率変数とする確率過程として捉える。ただし、車両追従挙動を鑑みると、主に前方車両挙動に応じて自車の加減速度を調整することから、車群中を走行する車両はたかだか 2 台前方までの車両走行挙動の影響しか受けないと仮定する。その上で N 台の車両で構成される車群に関して以下の仮説を措定する。

- (1) 車群中 i 番目車両の相対速度 $R_i (= V_i - V_{i-1})$ は、 $i-1$ 番目車両走行速度 V_{i-1} の値によって異なる平均、分散を持つ確率分布に従う。
- (2) 前方車両速度の関係で規定される相対速度分布の統計的性質は、ボトルネック上流側／下流側で異なる。
- (3) 同一の車群内では車群中 i 番目車両の相対速度 $R_i (3 \leq i \leq N)$ と、 $i-1$ 番目車両の相対速度 R_{i-1} とは互いに無相関である。

以下では、対象区間の追越車線に設置された車両感知器より得られた交通流パルスデータに基づき、仮説の検証を行う。

5.4 前方走行車両速度と相対速度の関係

5.4.1 前方車両走行速度水準別の相対速度

本項では、車群に属して走行する車両に関して前方車両走行速度と当該車両の相対速度分布の関係に着目する。図 5.6.1～図 5.6.8 に各観測地点で観測された車群について、前方車両速度とその後方車両の相対速度の関係を表す散布図を示す。また、前方車両速度を (1) 50[km/h]未満, (2) 50[km/h]以上 60[km/h]未満, (3) 60[km/h]以上 70[km/h]未満, (4) 70[km/h]以上 80[km/h]未満, (5) 80[km/h]以上 90[km/h]未満, (6) 90[km/h]以上 100[km/h]未満, (7) 100[km/h]以上 110[km/h]未満, (8) 110[km/h]以上 120[km/h]未満, (9) 120[km/h]以上, の 9 つの水準に分類し、各水準での相対速度の統計値を求めた。その結果を表 5.1 に整理する。

まず、前方車両走行速度と相対速度の関係に着目すると、ボトルネック上流側、下流側共に前方車両速度水準によって相対速度の分布は大きく異なることがわかる。特に、前方車両速度が 120[km/h]以上と高い場合は相対速度が負の領域に、前方車両速度が 90[km/h]

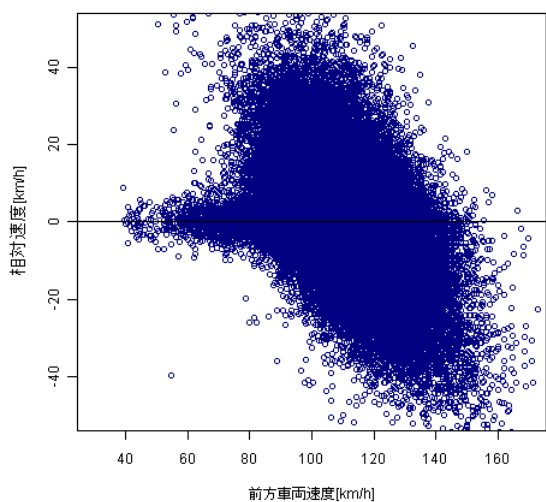


図 5.6.1 91.8kp 前方車両速度—相対速度

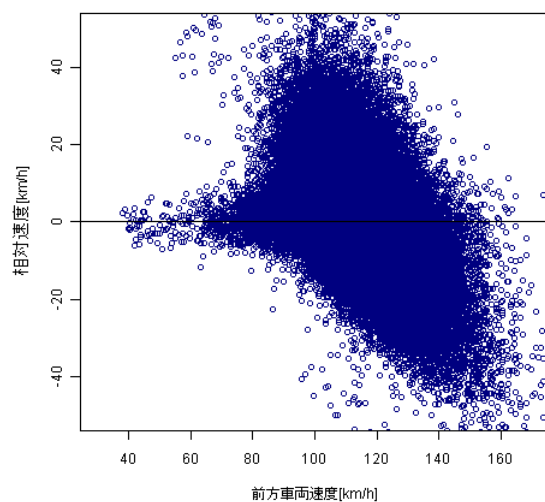


図 5.6.2 92.6kp 前方車両速度—相対速度

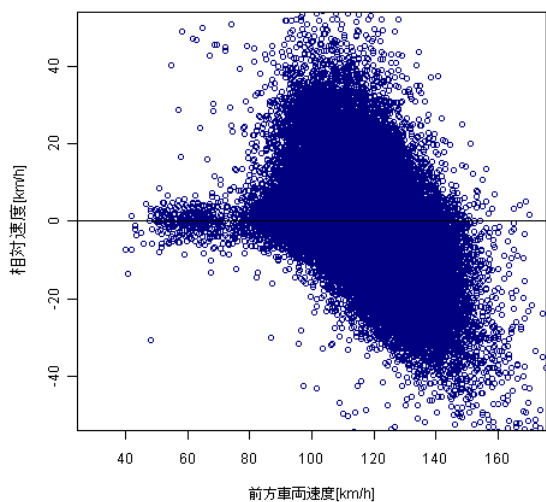


図 5.6.3 93.2kp 前方車両速度—相対速度

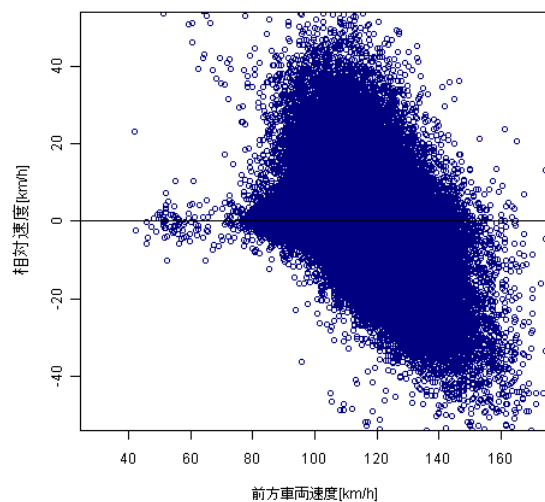


図 5.6.4 93.6kp 前方車両速度—相対速度

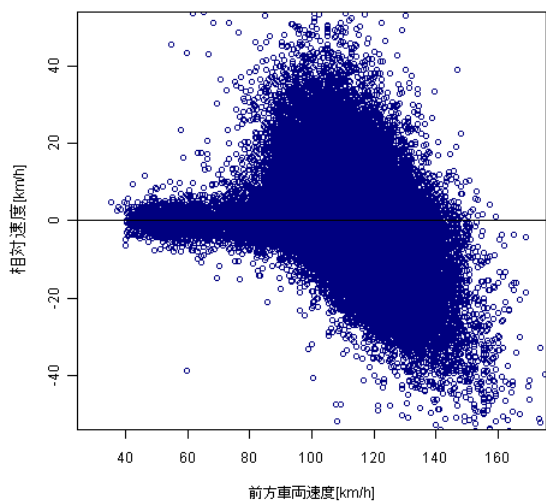


図 5.6.5 94.0kp 前方車両速度—相対速度

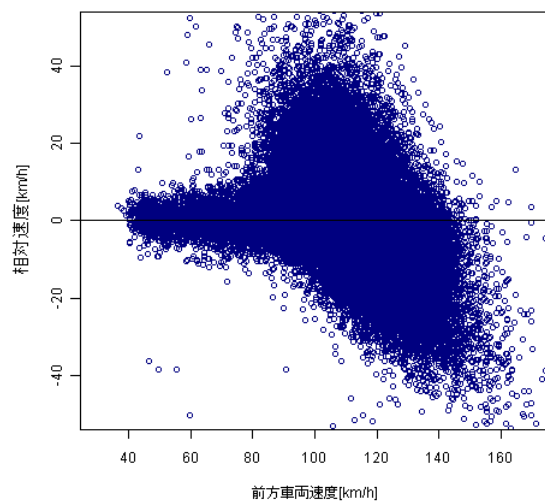


図 5.6.6 94.4kp 前方車両速度—相対速度

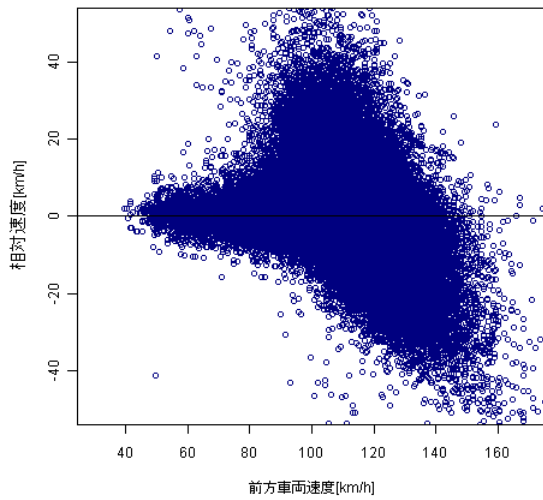


図 5.6.7 95.0kp 前方車両速度－相对速度

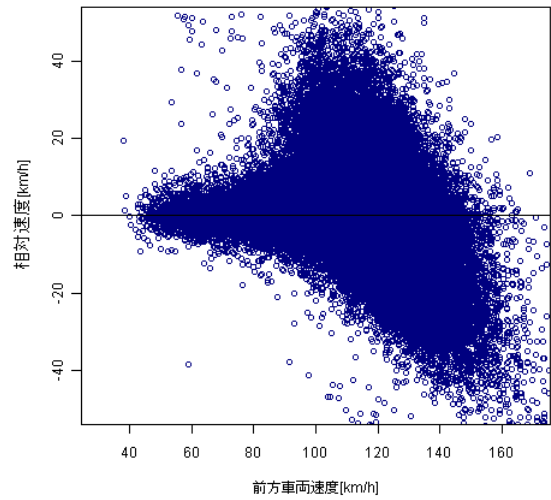


図 5.6.8 95.8kp 前方車両速度－相对速度

表 5.1 前方車両走行速度水準別の相对速度分布統計値

前方車両 走行速度水準	91.8kp地点			92.6kp地点			93.2kp地点			93.6kp地点		
	N	Mean [km/h]	S.D. [km/h]	N	Mean [km/h]	S.D. [km/h]	N	Mean [km/h]	S.D. [km/h]	N	Mean [km/h]	S.D. [km/h]
-50	57	-0.19	5.94	35	-0.91	2.92	19	-3.51	8.01	8	-1.80	2.55
50-60	118	4.00	2.79	53	5.76	16.81	117	1.41	9.13	54	1.76	10.95
60-70	373	2.03	14.88	127	4.44	13.93	168	2.98	12.45	32	11.22	22.00
70-80	747	4.99	7.70	416	2.02	7.05	150	2.12	8.57	111	5.44	11.00
80-90	2,724	5.81	10.24	2,224	2.56	6.77	912	2.58	6.89	841	3.07	7.39
90-100	10,097	3.65	9.41	10,140	2.94	6.92	4,673	2.97	6.83	5,742	3.24	6.96
100-110	21,032	1.35	8.16	26,468	1.88	6.89	15,134	2.24	6.83	20,298	2.31	6.74
110-120	21,800	-1.16	7.92	31,618	-0.32	6.97	20,837	0.26	6.85	31,428	0.57	6.77
120-	14,367	-5.30	8.21	22,757	-4.18	8.98	17,951	-3.59	8.78	29,596	-3.22	8.70

前方車両 走行速度水準	94.0kp地点			94.4kp地点			95.0kp地点			95.8kp地点		
	N	Mean [km/h]	S.D. [km/h]	N	Mean [km/h]	S.D. [km/h]	N	Mean [km/h]	S.D. [km/h]	N	Mean [km/h]	S.D. [km/h]
-50	354	0.29	2.37	343	0.15	4.13	92	0.27	5.03	109	0.25	3.23
50-60	656	0.18	4.26	644	0.37	5.88	501	1.00	5.68	501	0.99	6.54
60-70	482	0.74	7.01	1,198	0.44	4.02	933	0.78	5.51	1,040	0.76	5.81
70-80	664	1.18	6.16	1,569	0.59	5.35	1,918	0.95	4.54	1,797	0.77	4.28
80-90	2,266	1.95	6.08	3,459	2.09	6.35	3,693	1.21	5.67	5,500	0.97	4.40
90-100	8,455	2.20	6.25	11,067	1.98	6.40	9,686	2.30	6.55	11,618	1.36	5.53
100-110	19,752	1.35	6.45	24,027	1.11	6.34	22,178	1.41	6.41	21,176	1.79	6.39
110-120	21,284	-0.37	6.73	23,016	-0.70	6.79	23,261	-0.37	6.84	30,202	0.70	6.67
120-	13,496	-4.07	8.99	13,399	-4.35	8.76	14,583	-4.13	8.97	31,715	-2.93	8.48

以上 120[km/h]未満の領域では相対速度が正の領域に偏っていること、さらに前方車両速度が 90[km/h]未満になると相対速度の分散が極端に小さくなることが分かる。

前方車両速度が 120[km/h]以上の状況では、その後続の車両が前方車両速度よりさらに高い速度を希望走行速度に持つ確率が低くなるため、後続車両が前方車両より速い速度を取る確率が低くなり、その結果、相対速度の平均値が負になることが考えられる。一方、前方車両速度が 90[km/h]以上 120[km/h]未満の場合、前方車両速度より高い希望走行速度を持つ車両が前方車両に追い付きつつある状況であることが多く、相対速度の平均値が正になることが推察される。また、前方車両が 90[km/h]を下回る場合は、交通流が高密度な状態となっていることが予想され、相対速度分布の分散が小さくなるものと考えられる。

この傾向をより詳細に確認するために、前方車両走行速度水準毎の相対速度分散の均一性を検定するバートレット検定を行った。この検定手法では、帰無仮説「 H_0 ：すべての前方車両走行速度水準間で相対速度分散は等しい」の下、式(5.2)に示す統計量 K_B が自由度 $k-1$ の χ^2 分布に従う⁹⁾ことより、各水準での分散の均一性を検定する。

$$K_B = \frac{\sum_{i=1}^k (n_i - 1) \cdot \ln \left[\frac{\sum_{i=1}^k (n_i - 1) \cdot \hat{\sigma}_i^2}{\sum_{i=1}^k (n_i - 1)} \right] - \sum_{i=1}^k (n_i - 1) \cdot \ln \hat{\sigma}_i^2}{1 + \frac{1}{3 \cdot (k-1)} \left\{ \sum_{i=1}^k \frac{1}{n_i - 1} - \frac{1}{\sum_{i=1}^k n_i - 1} \right\}} \quad (5.2)$$

ただし、 k は前方車両走行速度水準数 (=9)、 n_i は前方車両走行速度水準 i のサンプル数、 $\hat{\sigma}_i^2$ は前方車両走行速度水準 i の相対速度分散の不偏推定量を表す。検定結果を表 5.2 に示す。これより、すべての観測地点において前方車両走行速度水準間での相対速度分散の均一性は棄却された。すなわち、前方車両走行速度水準間で相対速度分散が異なることが示唆される。

次に、前方車両速度水準毎の相対速度平均の差異に着目する。すでにバートレット検定で水準毎の相対速度の等分散性は棄却されているため、ここではノンパラメトリックに水準毎の母中央値の差の検定を行うクラスカル＝ワリス検定⁹⁾を適用する。これは、前方車両走行速度水準に関わらず全標本値を大きさ順に並べたときの順位に基づき、水準間の母中央値の差の有意性を検定するものである。式(5.3)で表される検定統計量 K_{KW} は帰無仮説「 H_0 ：各水準間で相対速度の母中央値に差はない」の下、自由度 $k-1$ の χ^2 分布に従う。

$$K_{KW} = 12 \sum_{i=1}^k n_i \frac{\{\bar{R}_i - (n+1)/2\}^2}{n(n+1)} \quad (5.3)$$

ただし、 n は全観測値数を表し、 \bar{R}_i は n 個の全観測値を小さい方から順位付けしたとき、前方車両走行速度水準 i に属する標本の順位の平均を表す。この検定結果を表 5.3 にまと

表 5.2 バートレット検定結果

観測地点	K_B	df	p 値
91.8kp地点	1633.49	8	0.00
92.6kp地点	2833.25	8	0.00
93.2kp地点	1794.21	8	0.00
93.6kp地点	2761.91	8	0.00
94.0kp地点	3313.26	8	0.00
94.4kp地点	3150.41	8	0.00
95.0kp地点	3538.01	8	0.00
95.8kp地点	6792.53	8	0.00

表 5.3 クラスカル=ワリス検定結果

観測地点	K_{KW}	df	p 値
91.8kp地点	7640.64	8	0.00
92.6kp地点	8510.79	8	0.00
93.2kp地点	5106.12	8	0.00
93.6kp地点	7014.62	8	0.00
94.0kp地点	4530.97	8	0.00
94.4kp地点	5571.62	8	0.00
95.0kp地点	5335.64	8	0.00
95.8kp地点	5894.72	8	0.00

める。これより、すべての観測地点において帰無仮説「 H_0 : 各水準間で相対速度の母中央値に差はない」は棄却された。すなわち、相対速度は前方車両走行速度水準毎にその母中央値が異なると結論づけられる。

以上の結果は、5.3 で推定した仮説(1)「車群中 i 番目車両の相対速度は、 $i-1$ 番目車両走行速度によって異なる平均、分散を持つ確率分布に従う」を支持するものである。

5.4.2 観測地点別の相対速度

続いて、観測地点間の相対速度分布の差異について検討する。表 5.1 中、前方車両走行速度水準が 50[km/h]以下の項に着目すると、ボトルネックの上流側に位置する 91.8kp, 92.6kp, 93.2kp, 93.6kp 地点では相対速度の平均値は負値を取っているのに対し、ボトルネックの下流側に位置する 94.0kp, 94.4kp, 95.0kp, 95.8kp 地点では正值となっている。この傾向を詳細に確認するため、以下では前方車両走行速度水準が 50[km/h]以下の状況に着目し、観測地点間の相対速度分布の差異について検討する。

まず、前方車両走行速度水準が 50[km/h]以下のときの各地点における相対速度観測値を図 5.7 に示す。これより、93.2kp, 94.4kp, 及び 95.0kp 地点では外れ値が存在することが

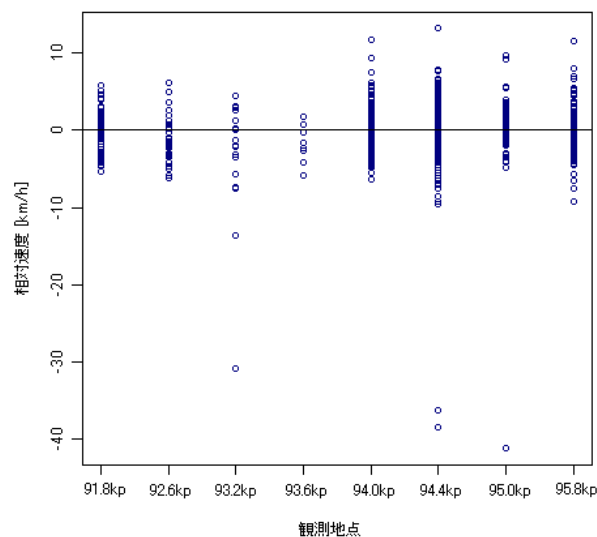


図 5.7 前方走行速度 50.0[km/h] 以下での相対速度観測値

分かる．そこで，観測地点間での相対速度の等分散性を検定するため，バートレット検定を適用した．その結果，

$$K_B = 187.48, df = 7, p \text{ 値} < 2.2\text{e-}16$$

が得られた．これより観測地点間での分散の均一性は棄却された．

次に，観測地点間での相対速度母中央値の差を確認するため，クラスカル=ワリス検定を行った．その結果，

$$K_{KW} = 20.38, df = 7, p \text{ 値} = 0.005$$

を得た．これより，有意水準 1%において観測値毎に相対速度の母中央値に差が存在すると言える．

続いて，観測地点をボトルネック上流（91.8kp～93.6kp）とボトルネック下流（94.0kp～95.8kp）に分類し，上流側と下流側で観測される相対速度の差異を調べる．ここでは，ノンパラメトリックに 2 群の母中央値の差を検定する Mann-Whitney 型のウィルコクソン検定⁹⁾を適用する．この検定手法は 2 つの群をこみにして観測値を順位付けし，上流側，及び下流側での各標本の順位和 R_1 , R_2 を算出する．このとき，帰無仮説「 H_0 : ボトルネック上流側と下流側では相対速度の母中央値に差はない」の下，式(5.4)で求まる統計量 U が平均 $n_1 n_2 / 2$ ，分散 $n_1 n_2 (n_1 + n_2 + 1) / 12$ の正規分布に従うことより，各群の母中央値の差の検定を行う．ただし， n_1 , n_2 はボトルネック上流側，及び下流側でのサンプル数を表す．

$$U = \min\left(R_1 - \frac{n_1(n_1 + 1)}{2}, R_2 - \frac{n_2(n_2 + 1)}{2}\right) \quad (5.4)$$

Mann-Whitney 型のウィルコクソン検定を適用した結果，

$$U = 120,205, p \text{ 値} < 2.2\text{e-}16$$

を得た．これより，帰無仮説は棄却され，両者の母中央値に差が存在すること，すなわち，ボトルネック上流側で観測される相対速度は下流側で観測される相対速度と比較して，小さい値を取る傾向にあることが示された．この結果は，5.3 で措定した仮説(2)「前方車両速度の関係で規定される相対速度分布の統計的性質は，ボトルネック上流側／下流側で異なる」を支持するものである．

さらに，相対速度分布の平均が 0 より小さくなる場合は，車群内走行速度は漸次低下する傾向にあることが考えられる．そこで，ボトルネック上流側で観測された相対速度を対象に，帰無仮説「 H_0 : 相対速度の平均値=0」の下， t 検定を行った．その結果，

$$t = -2.693, df = 108, p \text{ 値} = 0.0082$$

を得た．これより，帰無仮説「 H_0 : 相対速度の平均値=0」は有意水準 1%において棄却され，前方車両走行速度が 50[km/h]以下のとき，ボトルネック上流側では車群内相対速度の平均は負値となることが示された．すなわち，走行速度水準が低くなると，減速波の影響により車群内車両走行速度は漸次低下する傾向が生じると言える．

5.5 車群中車両相対速度の無相関性

5.5.1 相対速度の無相関性検定方法

本節では車群内車両の相対速度の無相関性について検証を行う． n 台の車両で構成される車群内で連続する車両の相対速度が無相関であるためには，車群中 i 番目車両の相対速度 $R_i (= V_i - V_{i-1}, 3 \leq i \leq n)$ と $i-1$ 番目車両の相対速度 R_{i-1} の間に自己相関が存在しないことが必要条件となる．そこで， n 台の車群に関する位相 1 の相対速度自己相関係数 ρ_n を，

$$\rho_n = \frac{\sum_{i=2}^{n-1} (r_i - \bar{\mu}_1)(r_{i+1} - \bar{\mu}_2)}{\sqrt{\sum_{i=2}^{n-1} (r_i - \bar{\mu}_1)^2 \cdot \sum_{i=3}^n (r_i - \bar{\mu}_2)^2}} \quad (5.5)$$

と定義する．ただし， r_i は i 番目車両の相対速度観測値を， $\bar{\mu}_1$ ， $\bar{\mu}_2$ はそれぞれ，

$$\bar{\mu}_1 = \frac{1}{n-2} \sum_{j=2}^{n-1} r_j, \quad \bar{\mu}_2 = \frac{1}{n-2} \sum_{j=3}^n r_j$$

を表す． $\rho_n = 0$ が成立する場合，式(5.6)で表される統計量 F は自由度 $(1, n-4)$ の F 分布に従うことが明らかとなっている¹⁰⁾．

$$F = \frac{(n-4)\rho_n^2}{1 - \rho_n^2}, \quad n \geq 5 \quad (5.6)$$

ここで，自由度 (n, m) の F 分布の確率密度関数を $f(x|n, m)$ ，実際に観測される車群台数分布，すなわち全観測車群数に対する i 台の車群が観測された割合を $p(i)$ と表す．このとき，観測された全車群に対して $\rho_n = 0$ が成立するとの仮定の下では，全車群に対してそれぞれ算出される統計量 F は確率密度関数が式(5.7)で与えられる分布に従う．

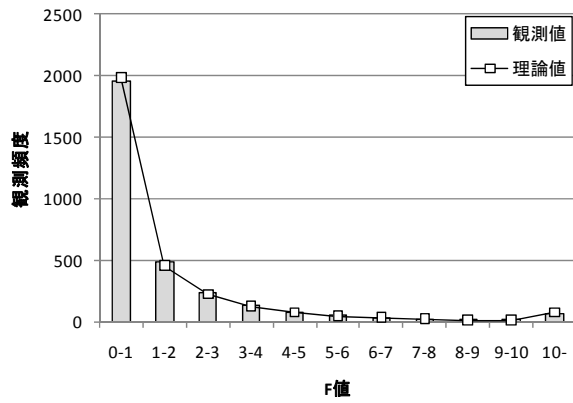
$$G(x) = \begin{cases} \sum_{i=5}^{\infty} p(i) \cdot f(x|1, i-4) & (x > 0) \\ 0 & (x \leq 0) \end{cases} \quad (5.7)$$

これより，観測された全ての車群に対して算出される統計量 F の分布が式(5.7)の分布に適合すれば， $\rho_n = 0$ の成立が示される．

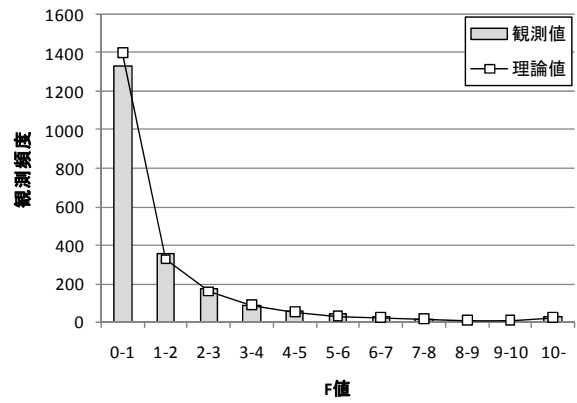
5.5.2 相対速度の無相関性の検証

5.2 に示したデータに基づき各観測地点毎に自由流状態の交通流を対象に，先頭車両を含めて 10 台以上で構成される車群を抽出，各車群に対して式(5.6)で算定される統計量 F を求め，その分布と式(5.7)で記述される確率密度関数の適合度を求める．ただし，エラーデータの識別方法，渋滞及び車群の定義は第 3 章に倣い，観測エラーと判断された車両を含む車群は除外する．

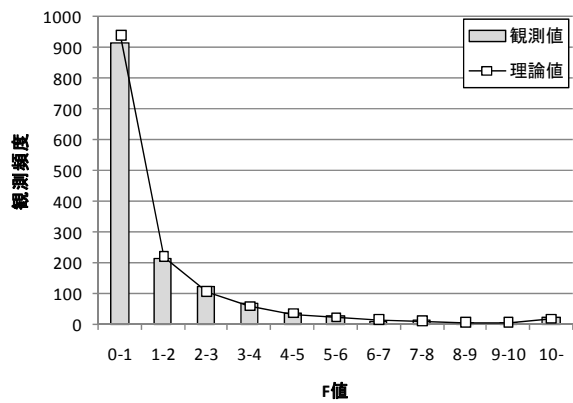
その結果を図 5.8 に示す．図より，各観測地点共に観測値は理論値と適合していることが確認できる．このことを統計的に確認するため，観測値と理論値の適合度検定を行った．その結果を表 5.4 にまとめる．



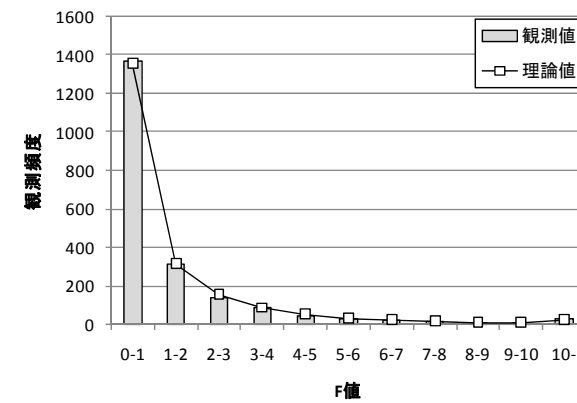
(a) 91.8kp 地点



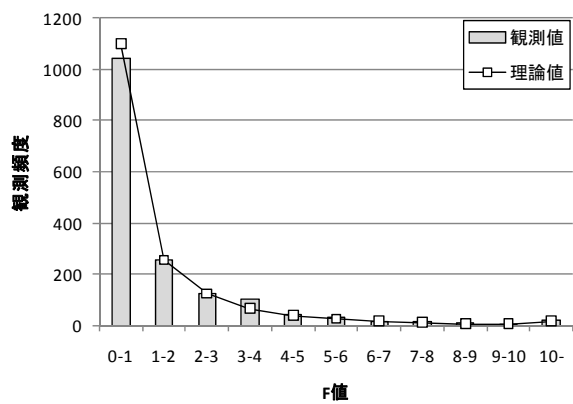
(a) 92.6kp 地点



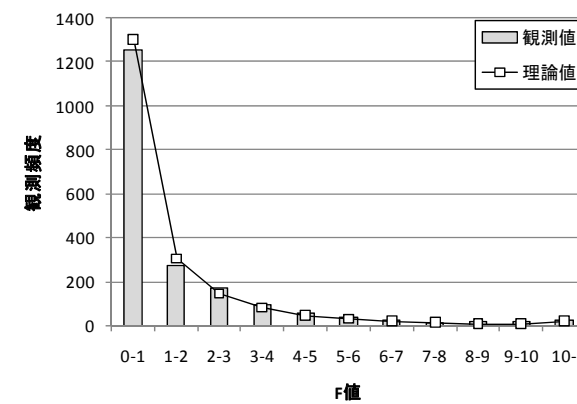
(a) 93.2kp 地点



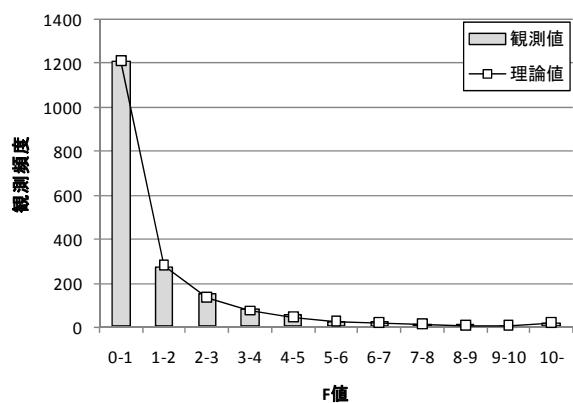
(a) 93.6kp 地点



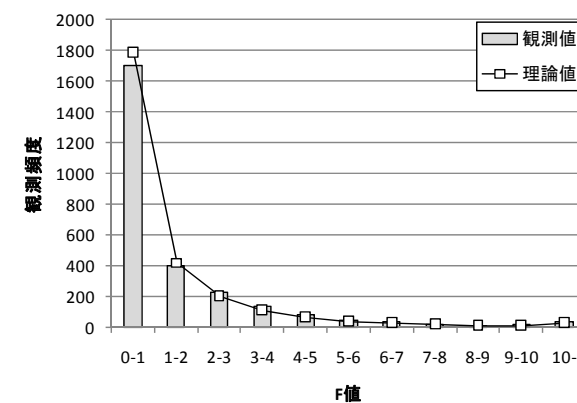
(a) 94.0kp 地点



(a) 94.4kp 地点



(a) 95.0kp 地点



(a) 95.8kp 地点

図 5.8 車群内相対速度自己相関係数に関する統計量 F の分布

表 5.4 車群内相対速度自己相関係数の適合度検定

F値区分	91.8kp地点			92.6kp地点			93.2kp地点			93.6kp地点		
	観測値 n	理論値 m	$(n-m)^2/m$	観測値 n	理論値 m	$(n-m)^2/m$	観測値 n	理論値 m	$(n-m)^2/m$	観測値 n	理論値 m	$(n-m)^2/m$
0	1	0.0	-	1	0.0	-	0	0.0	-	1	0.0	-
0-1	1,957	1990.5	0.53	1,334	1403.4	3.33	912	940.4	0.86	1,364	1357.4	0.04
1-2	486	459.2	1.56	353	326.1	2.22	211	218.5	0.26	313	315.5	0.02
2-3	234	225.9	0.29	172	157.0	1.43	121	105.2	2.37	140	151.8	0.92
3-4	137	128.9	0.50	84	86.4	0.07	66	57.9	1.14	90	83.5	0.51
4-5	80	80.2	0.00	56	51.4	0.42	36	34.4	0.08	46	49.5	0.25
5-6	52	53.0	0.02	44	32.2	4.33	28	21.5	1.94	30	31.0	0.03
6-7	37	36.7	0.00	29	21.0	3.01	9	14.1	1.82	21	20.2	0.03
7-8	24	26.3	0.21	17	14.2	0.54	13	9.5	1.29	12	13.7	0.20
8-9	22	19.5	0.32	8	9.9	0.36	4	6.6	1.03	10	9.5	0.03
9-10	18	14.8	0.69	9	7.1	0.53	5	4.7	0.02	8	6.8	0.23
10-	67	79.9	2.09	26	24.3	0.12	24	16.2	3.78	27	23.1	0.65
	χ_0^2		6.21	χ_0^2		16.36	χ_0^2		14.58	χ_0^2		2.91
	df		10	df		10	df		10	df		10
	$\chi^2_{0.05, df}$		18.31	$\chi^2_{0.05, df}$		18.31	$\chi^2_{0.05, df}$		18.31	$\chi^2_{0.05, df}$		18.31

F値区分	94.0kp地点			94.4kp地点			95.0kp地点			95.8kp地点		
	観測値 n	理論値 m	$(n-m)^2/m$	観測値 n	理論値 m	$(n-m)^2/m$	観測値 n	理論値 m	$(n-m)^2/m$	観測値 n	理論値 m	$(n-m)^2/m$
0	1	0.0	-	2	0.0	-	0	0.0	-	0	0.0	-
0-1	1,042	1101.7	3.12	1,252	1306.1	2.08	1,209	1218.2	0.07	1,698	1788.2	4.55
1-2	256	256.1	0.00	271	303.6	3.51	274	283.2	0.30	402	415.9	0.46
2-3	123	123.1	0.00	173	145.9	5.03	147	136.1	0.87	229	199.6	4.33
3-4	105	67.5	20.81	98	80.0	4.04	79	74.7	0.25	135	109.3	6.07
4-5	41	39.9	0.03	55	47.3	1.25	56	44.2	3.16	78	64.4	2.86
5-6	31	24.9	1.50	37	29.5	1.91	23	27.6	0.75	47	40.0	1.21
6-7	17	16.2	0.04	25	19.2	1.78	25	17.9	2.81	38	25.9	5.63
7-8	14	10.9	0.90	11	12.9	0.27	11	12.0	0.09	20	17.4	0.40
8-9	13	7.5	3.99	17	8.9	7.36	7	8.3	0.21	13	12.0	0.09
9-10	7	5.3	0.52	17	6.3	18.07	3	5.9	1.44	14	8.4	3.65
10-	21	17.9	0.53	23	21.2	0.14	14	19.9	1.76	35	27.9	1.78
	χ_0^2		31.45	χ_0^2		45.44	χ_0^2		11.72	χ_0^2		31.03
	df		10	df		10	df		10	df		10
	$\chi^2_{0.05, df}$		18.31	$\chi^2_{0.05, df}$		18.31	$\chi^2_{0.05, df}$		18.31	$\chi^2_{0.05, df}$		18.31

これより、ボトルネック下流側に位置する 94.0kp 地点、94.4kp 地点、95.8kp 地点以外では、5%有意水準において帰無仮説は棄却されず、観測値は理論値に適合しないとは言えないことが示された。すなわち、観測されたすべての車群に対して、 $\rho_n = 0$ が成立すると言える。これは、5.3 で措定した仮説(3)「車群中 i 番目車両の相対速度 R_i と $i-1$ 番目車両の相対速度 R_{i-1} とは互いに無相関である」を支持する結果である。

5.5.3 相対速度自己相関についての考察

5.5.2 より、ボトルネック上流側では車群内の相対速度に自己相関は生じないことを確認した。その一方で、下流側に位置する 94.0kp 地点、94.4kp 地点、95.8kp 地点では、車群内で連続する車両の相対速度には相関が生じる、との結果を得た。以下、この結果について考察を行う。

3 台の車両が前方車両に対して追従走行している状況を考え、その先頭車両の走行速度を v_i 、2 台目の車両の走行速度を v_{i+1} 、相対速度を r_{i+1} 、3 台目の車両の走行速度を v_{i+2} 、相対速度を r_{i+2} とする。 v_i が高く 110[km/h] 以上の場合、図 5.6 を参照すると後続の車両の相対速度 r_{i+1} は負値を取る傾向があり、 v_{i+1} は v_i と比べて小さい値を取りやすい。さらに、これに応じて v_{i+1} が 90[km/h]~110[km/h] の値を取った場合、後続車両の相対速度 r_{i+2} は図 5.6

を参照すると、正值を取る傾向にあると考えられる。このような場合、車両 $i+1$ と $i+2$ の相対速度の間には、負の相関が生じることが考えられる。このように、連続して走行する3台の車両に対し、先頭車両の走行速度水準によっては、後続する2台の相対速度の間に相関が生じる可能性がある。

このことを確認するために、各観測地点において車群に属する3台の車両を抽出した上で、その1台目車両の走行速度水準毎に後続2車両の相対速度相関を算出した。さらに、得られた相関係数 $r=0$ の仮説の下では、式(5.8)で求められる統計量 T は自由度 $N-2$ の t 分布に従うことを踏まえ、算出された相関係数の有意性を検定する。

$$T = \frac{\sqrt{N-2} \cdot r}{\sqrt{1-r^2}} \quad (5.8)$$

ただし、 N はサンプル数を表す。検定の結果を表 5.5 にまとめる。

表より、すべての観測地点で、走行速度水準が 90[km/h]以上になると有意かつ弱い負の相関が生じる傾向にあることが確認できる。これは、前方車両速度が 110[km/h]以上の高い状況では負の相対速度を取りやすく、かつ前方車両速度が 90[km/h]～110[km/h]では正の相対速度を取りやすいため、走行速度が高い領域と中程度の領域間で振動する傾向を持つためであると考えられる。前方車両速度水準が 90[km/h]未満になると、相対速度にほぼ相関が見られなくなることが分かる。しかし、5.5.2 で相対速度の無相関性が棄却された 94.0kp, 94.4kp, 95.8kp 地点では前方車両走行速度水準 60[km/h]未満でも負の相関が生じていることが確認できる。相対速度に負の相関が生じるということは、車群の中での走行速度が振動しつつも平均的には安定していることに等しい。すなわち、車群内車両の相対速度の無

表 5.5 走行速度水準別相関係数の検定

前方車両 走行速度水準	91.8kp地点			92.6kp地点			93.2kp地点			93.6kp地点		
	相関係数	自由度	T値	相関係数	自由度	T値	相関係数	自由度	T値	相関係数	自由度	T値
-60	-0.063	166	0.809	-0.021	84	-0.194	0.094	125	1.052	0.044	55	0.325
60-70	-0.043	363	-0.821	-0.093	116	-1.007	-0.041	159	-0.511	0.067	29	0.363
70-80	0.020	665	0.604	0.038	397	0.760	0.184	140	2.210 *	0.132	100	1.334
80-90	-0.200	2,192	-9.575 **	0.012	2,054	0.535	-0.058	840	-1.689	0.010	763	0.270
90-100	-0.259	7,738	-23.618 **	-0.134	8,501	-12.494 **	-0.119	4,064	-7.619 **	-0.079	4,955	-5.590 **
100-110	-0.297	15,668	-38.979 **	-0.230	20,460	-33.822 **	-0.209	12,233	-23.686 **	-0.211	16,416	-27.673 **
110-120	-0.369	15,277	-49.120 **	-0.335	22,456	-53.303 **	-0.320	15,365	-41.898 **	-0.294	23,370	-46.973 **
120-	-0.416	6,974	-38.198 **	-0.374	10,858	-42.004 **	-0.368	8,800	-37.151 **	-0.355	14,214	-45.252 **

前方車両 走行速度水準	94.0kp地点			94.4kp地点			95.0kp地点			95.8kp地点		
	相関係数	自由度	T値	相関係数	自由度	T値	相関係数	自由度	T値	相関係数	自由度	T値
-60	-0.110	988	-3.485 *	-0.238	925	-7.443 **	-0.059	553	-1.396	-0.170	550	-4.056 **
60-70	0.036	469	0.774	-0.037	1,163	-1.253	0.018	875	0.540	-0.171	942	-5.340 **
70-80	0.020	628	0.512	0.104	1,513	4.079 **	-0.016	1,837	-0.698	-0.068	1,674	-2.771
80-90	-0.007	2,094	-0.343	-0.016	3,204	-0.924	0.006	3,428	0.378	-0.094	5,173	-6.791 **
90-100	-0.112	7,341	-9.634 **	-0.123	9,583	-12.178 **	-0.049	8,360	-4.521 **	-0.084	10,552	-8.692 **
100-110	-0.235	15,862	-30.505 **	-0.242	19,225	-34.579 **	-0.212	17,696	-28.888 **	-0.170	17,718	-22.978 **
110-120	-0.296	15,588	-38.733 **	-0.319	16,631	-43.404 **	-0.317	16,499	-42.994 **	-0.299	22,983	-47.584 **
120-	-0.362	6,601	-31.507 **	-0.377	6,654	-33.202 **	-0.377	6,856	-33.737 **	-0.336	15,053	-43.771 **

* p=0.05 ** p=0.01

相関性が棄却された各地点ではボトルネックの下流に位置し、減速波の影響を受けにくい
ため、車群内車両相対速度に負の相関が生じることが考えられる。

一方、5.5.2 で相対速度の無相関性が棄却されなかった地点であっても、前方車両走行
速度が 90[km/h]以上の場合、相関速度に負の相関を持つ傾向にあるとの結果が得られてい
る。これは一見「同一車群内の連続する車両の相対速度に関して相関は生じない」との知
見と矛盾するように思われる。しかし、走行速度水準別に見た相対速度の相関は、車群と
いう枠組みを超えて相対速度相関を算定したものである。言い換えると、表 5.5 の結果は、
車群内で時系列的に観測される相対速度の内、特定の条件に合致するデータのみを抽出し
て相関を求めたに過ぎない。

すなわち、表 5.5 のように走行速度水準別に見て連続する車両間で相関速度に相関が生
じるとの結果を得たとしても、「同一車群内の連続する車両の相対速度に関して相関は生じ
ない」との知見とは矛盾しない。

5.6 結語

本章では、車群内車両の走行速度遷移過程を確率過程と見なし、相対速度の遷移特性に
ついて分析を行った。

まず、対象区間内の 8 地点に設置された車両感知器で取得された交通流パルスデータに
基づき、ボトルネック位置を特定した。

続いて、車群として走行する車両に関して、

- (1) 車群中車両の相対速度分布は、その前方車両走行速度によって異なる平均、分散を
持つ。
- (2) 相対速度分布の統計的性質は、ボトルネック上流側／下流側で異なる。
- (3) 同一の車群内では連続する車両の相対速度は無相関である。

との仮説を措定し、その検証を行った。

仮説(1)に関しては、連続する 2 車両の内、前方車両の走行速度水準毎に相対速度の平均、
分散を算出、水準間での差異を検定した。

仮説(2)に関しては、前方車両走行速度水準が 50[km/h]未満の時の相対速度に着目し、観
測地点間での相対速度の母中央値の比較を行った。

仮説(3)に関しては、10 台以上の車両で構成される全ての車群に対して位相 1 の自己相関
係数を算出し、その分布特性を調べた。

その結果、(1)～(3)のすべてについて仮説を支持する結果が得られた。さらに、ボトルネ
ック上流側では車群中車両走行速度が 50[km/h]に低下すると、相対速度分布の平均値は負
となり、減速傾向が生じることとも明らかとなった。

今後は、上述の現象が生起するメカニズムを車両挙動の観点から考察し、検証を行う。
その際、本分析では車群内車両の走行速度の変動特性のみに着目したが、より精緻に車群

挙動を理解するためには車頭時間の変動についても分析を行い、その特性を把握する必要がある。また、本研究では、車群中を走行する車両はたかだか2台前方までの車両走行挙動の影響しか受けないと仮定の下、分析を行った。しかし、実際の交通流では1台前方の車両のみならず、複数台前方の車両の挙動にも影響を受けることも考えられる。すなわち、車群内の相対速度相関について位相1の自己相関についてのみ検証を行ったが、様々な位相での自己相関係数について吟味し、車群内相対速度の周期性についても検討を行う余地がある。

第 5 章 参考文献

- 1) 越正毅：高速道路のボトルネック容量，土木学会論文集，No.371/4-5，pp.1-7，1986.
- 2) 栗原光二，羽山章，安積淳一：ボトルネック対策としての付加車線の効用，高速道路と自動車，第 42 巻，第 7 号，pp.29-36，1999.
- 3) 大口敬，桑原雅夫，赤羽弘和，渡邊亨：ボトルネック上流における車線利用率の矯正効果と付加車線設置形態，交通工学，Vo.36，No.1，pp.59-69，2001.
- 4) 渡辺亨，逢坂光博，平井章一：高速道路における渋滞対策としての単路部付加車線のあり方，交通工学，Vol.38 増刊号，pp.41-44，2003.
- 5) 吉川良一，長浜和実，シンジャン，吉井稔雄，北村隆一：高速道路暫定 2 車線区間におけるボトルネック交通容量に関する考察，土木計画学研究・論文集，Vol.22，NO.4，pp.839-846，2005.
- 6) 石田友隆，桑原雅夫，Edward Chung：都市間高速道路における車群特性に関する定量的分析，土木計画学研究・講演集 CD-ROM，Vol.28，2003.
- 7) 塩見康博，吉井稔雄，北村隆一，吉川良一：車群形成過程を再現するボトルネック容量推定シミュレーション，第 26 回交通工学研究発表会論文報告集，pp.45-48，2006.
- 8) 栗原光二，日置洋平：4 車線高速道路の交通実態と交通容量改善策，土木計画学研究・講演集，No.17，pp.563-566，1995.
- 9) 竹内啓：統計学事典，東洋経済新報社，1989.
- 10) 小針現宏：確率・統計入門，岩波書店，1973.

第6章 渋滞発生確率推定モデルの構築と適用

6.1 概説

交通流は多様な走行特性を持つ車両の集合であり、表出する交通現象は確率的な性質を持つ。交通渋滞の発生については、従来、ボトルネックとなる道路断面の交通容量を上回る流入交通需要量が生起したときに渋滞が発生するとされてきた¹⁾が、実現象では渋滞発生時の交通量は、可能交通容量よりも低く大きくばらつくことが明らかとなっている²⁾。

本章では、第4章で構築した車群形成モデル、及び第5章で得た車群内車両走行挙動特性に基づき、ボトルネックへの流入交通流率に対する渋滞発生確率を推定するモデルを構築し、渋滞発生時交通量がばらつく現象を説明することを目的とする。さらに、同モデルを高速道路片側1車線区間で取得されたデータに適用、モデルの検証を行うと共に、渋滞の発生を抑制する有効な施策について検討する。

6.2 渋滞発生時交通量変動メカニズム

6.2.1 既往研究のレビュー

渋滞現象を流入交通量に対して生起する確率現象と位置づけ、その確率的性質を明らかとする研究はこれまでにいくつかなされている。

Lorenz *et al.*³⁾や岡村ら²⁾は、高速道路ボトルネックで発生する渋滞を対象に、ある流入交通量水準の出現回数に対する、その流入交通量水準での渋滞発生回数の割合を「渋滞発生割合」と定義、流入交通量水準と渋滞発生割合の関係を示した。その結果、流入交通量が増大するに従い、渋滞発生割合も増加することを確認した。しかし、ここで定義された渋滞発生割合は、非渋滞状態が継続するという条件付き渋滞発生確率の実現値を表す⁴⁾にすぎない。そのため、観測によって得られる流入交通量と渋滞発生割合の関係は流入交通量に対して必ずしも単調増加とはならないことが確認されている。

Brilon *et al.*⁵⁾は、交通容量の観測を制限付き観測（Censored Observation）と見立てた。すなわち、交通容量はある確率分布に従うとの仮定の下、ある交通量で渋滞が発生した場合はその観測値を **Uncensored Data** と定義し、自由流状態で観測された交通量データに関しては、交通容量に至っていないとの観点から **Censored Data** と定義した。その上で、生存時間分析の手法を援用、交通容量の分布を **Product Limit Method**⁶⁾を用いて推定する手法を構築し、推定された交通容量分布の累積分布を流入交通量に対する渋滞発生確率と定義している。

Xing ら⁷⁾は Brilon *et al.*による手法を日本の高速道路に適用し、観測された渋滞発生時交通量の分布に対し、推定された交通容量分布は交通量の高い方向へシフトすることを確認している。

また、Bernard *et al.*⁸⁾は交通容量と共に、流入交通量も交通需要量の関係で記述される確

率的な分布を持つとし、流入交通量が交通容量を上回る確率を渋滞発生確率と定義、交通需要量に対する渋滞発生確率を算出している。

上述のモデルでは交通容量そのものが変動することを仮定することで、渋滞発生時交通量のばらつきを説明するものである。その際、流入交通量の時間的な変動に対して交通容量が独立に変動することを仮定している。しかし、現実には交通量の高い状態が連続して続き、高密な交通流状態になるとわずかな交通流攪乱でも減速波が生じ、渋滞が発生することが考えられる。そもそも、交通容量とはボトルネックの幾何構造などの静的な条件によって決定される指標である。渋滞発生時交通量が増加するのは、ボトルネックの容量が増加するのではなく、渋滞が発生する交通流状態が確率的に生起することに起因すると考えられ、その結果として交通容量が増加するかの如くに観測されたに過ぎない。すなわち、流入交通量の変動に対し、交通容量が独立に変動するとの仮定は現実の交通現象と大きく乖離する。

一方、渋滞を発生させる特定の交通流状態が流入交通量に対して確率的に生起することで、渋滞発生時交通量が増加を持つことを説明する研究もなされている。

Laval⁹⁾は、線形近似された交通量－密度関係を仮定した上で、全車両が等速度で走行する均質な交通流に対し、低速度走行車が混入し **Moving Bottleneck** となって交通容量を低下させるメカニズムを **Kinematic Wave Theory** を援用して解析している。しかし、交通流を構成する車両特性を普通車と低速車の2種類に限定しており、モデルの一般化が課題となっている。

筆者らの先行研究¹⁰⁾では、高速道路片側1車線区間で形成される車群に着目し、車群後方に位置する車両の車頭時間は前方に位置する車両の車頭時間より大きい傾向があることを明らかとした。その上で、ボトルネック地点で一定台数以上の車群が形成された状態を渋滞と定義し、片側1車線区間で形成される車群台数のばらつきによって渋滞発生時交通量が増加することを説明している。

Kuhne *et al.*¹¹⁾は、交通需要量とボトルネック流出レートの差異からボトルネック上流側に車群 (**Car cluster**) が形成されるとし、この **Car cluster** に属する車両台数の分布を算出する手法を構築した。さらに、車両台数がある閾値を超過する確率を渋滞発生確率と定義し、交通需要量に対する渋滞発生確率の算出を試みている。

しかし、必ずしも一定以上の大きさの車群が形成されることで渋滞が発生する訳ではないこと⁴⁾や、車群中の特異な挙動を取る車両が渋滞発生のかきかけとなること¹²⁾が指摘されており、車群がボトルネックへ流入することで渋滞が発生するメカニズムについてより詳細に検討する必要がある。

6.2.2 本研究での視点

対する本研究では、第5章においてボトルネック直上流のある道路断面を車群が通過する際の、車群内車両走行状態の遷移過程、具体的には相対速度の遷移過程について詳細に

分析し、以下の知見を得た。

- (1) 車群内車両の相対速度分布は、前方車両走行速度水準によって異なる。
- (2) 前方車両走行速度水準が低くなると相対速度分布の平均は負値となり、車群内車両速度は減速する傾向を持つ。
- (3) 車群内で連続する 2 車両の相対速度に関して、後方車両相対速度は前方車両相対速度に対して無相関に決定される。

この知見を勘案すると、車群がボトルネックに流入する際に渋滞が発生する状況とは、前方車両に対して無相関に相対速度が確率的に変動する中で、ごくわずかな確率で大きく減速する特異な車両が出現し、さらにある確率でその攪乱が減速波を生じさせ、上流側へ伝播する状況と換言できよう。また、車群中のある車両の走行速度はその直前の車両の走行速度に依存して確率的に決定されることより、車群内走行速度の遷移過程はマルコフ性を持つと考えられる。

そこで本研究では、ボトルネックへ流入する車群の形成状況が確率的に記述される、という既往研究での知見に加え、形成された車群によっても、その車群から渋滞が発生するか否かが確率的に決定されると考える。すなわち、車群毎に渋滞発生確率が記述される、との視座に立ち、渋滞発生時交通量が変動するメカニズムを説明し、流入交通流率に対する渋滞発生確率を推定するモデルを構築する。

6.3 渋滞発生確率の定義

上述の既往研究では渋滞発生確率を、ある観測時間間隔内（e.g. 1 分間、5 分間）にボトルネックへ流入する交通量に対して **Traffic Breakdown** が生起する確率として定義している。その際、ある時間帯で渋滞が発生する確率は前後の時間帯に対して独立であるとの仮定が置かれている。しかし、実際には交通流状態は時間的連続に変化するものであり、例えばある 5 分間にボトルネックへ流入する交通量が高く、走行速度の低下が見られたとしても、その次の 5 分間にボトルネックへ流入する交通量が低い場合は渋滞が発生しないことも考えられる。すなわち、上述の定義では必ずしも当該時間帯に観測された流入交通流率に対する渋滞発生確率が算出されていないことが指摘される。

本研究では下流端がボトルネックとなっている区間長 L の片側 1 車線区間の上流端から無限に長い時間 T に渡って定常的に交通流率 $Q[\text{veh/h}]$ で車両が流入する状況を想定する。その上で、単位時間あたりに渋滞が発生する確率 $P_{BD}(Q)$ について考える。

このとき、ボトルネックに流入する車群毎に **Traffic Breakdown** が生起する確率（以降、車群渋滞発生確率とする）が定義されると仮定する。ただし、第 5 章の知見より、車群内車両の相対速度は前方車両走行速度に依存して確率的に決定されることから、形成される車群の特性は車群台数 k と車群先頭車両走行速度 v_{top} で記述可能である。そこで、車群渋滞発生確率を車群台数と車群先頭車両走行速度の関数として $p_{bd}(v_{top}, k)$ と表す。

対象区間内で j 番目に形成される車群の先頭車両速度を v_{top}^j ，車群台数を k_j ，車群中全車両がボトルネックを通過するのに要する時間を t_j とする．このとき， j 番目の車群がボトルネックに流入することによって，ボトルネックでは Traffic Breakdown が確率 $p_{bd}(v_{top}^j, k_j)$ で発生する状態が時間 t_j だけ継続されることとなる．言い換えると，単位時間中， t_j/T の割合でボトルネックでの Traffic Breakdown 発生確率が $p_{bd}(v_{top}^j, k_j)$ という状態になると言える．そこで，本研究では，単位時間中の Traffic Breakdown 発生確率の期待値を，流入交通流率 $Q[\text{veh/h}]$ に対する単位時間当たりの渋滞発生確率 $P_{BD}(Q)$ と定義する．このとき，渋滞発生確率 $P_{BD}(Q)$ は式(6.1)で算出される．

$$P_{BD}(Q) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \sum_{j=1}^n t_j \cdot p_{bd}(v_{top}^j, k_j) \quad (6.1)$$

ただし， n は時間 T 中に形成された全車群数を表す．

以下では，車群渋滞発生確率 $p_{bd}(v_{top}^j, k_j)$ の算出方法について詳述する．

6.4 車群渋滞発生確率の算出法

第5章で得た知見，「車群内を走行する車両 i の相対速度は，前方車両 $i-1$ の走行速度の関係で規定される相対速度分布のみに従って決定される」は，「車群内車両走行速度の遷移過程はマルコフ性を持つ」と言い換えることができる．そこで本節では，この知見に基づいて車群渋滞発生確率を算出する手法を構築する．

6.4.1 相対速度分布に基づく車群中車両走行速度分布

本研究では，山岡ら¹³⁾によって提案された渋滞判定手法を援用し，車群中の車両走行速度がある閾値以下となった瞬間に Traffic Breakdown が完遂し，渋滞が発生すると定義する．そこで，車群渋滞発生確率の算出に当たり，車群中 i 番目車両の走行速度分布について考える．ここで，車群先頭車両速度が v_{top} のとき，車群中 i 番目車両走行速度 V_i は累積分布関数 $F_i(v_i | v_{top})$ に従うとする．さらに，車両 $i-1$ の走行速度 $V_{i-1} = v_{i-1}$ のとき，後続の車両 i の相対速度 R_i は確率密度関数 $g(r | V_F = v_{i-1})$ に従うとする．

まず，車群先頭車両速度が v_{top} のとき，車群中 2 台目車両の走行速度 V_2 が v_2 以下となる確率 $\Pr[V_2 \leq v_2 | V_1 = v_{top}] = F_2(v_2 | v_{top})$ を考える．車群中 $i-1$ 番目車両，及び i 番目車両の走行速度 V_i ， V_{i-1} と i 番目車両の相対速度 R_i の関係は，

$$V_i = V_{i-1} + R_i \quad (6.2)$$

と書けることより， $V_2 \leq v_2$ が成立するためには，2 台目車両の相対速度 R_2 が $R_2 \leq v_2 - v_{top}$ を満たす必要がある．すなわち， $\Pr[V_2 \leq v_2 | V_1 = v_{top}]$ は式(6.3)のように表される．

$$\begin{aligned} \Pr[V_2 \leq v_2 | V_1 = v_{top}] &= \int_{-\infty}^{v_2 - v_{top}} g(r | V_F = v_{top}) dr \\ &= F_2(v_2 | v_{top}) \end{aligned} \quad (6.3)$$

次に，車群中 3 台目車両の走行速度 V_3 が v_3 以下となる確率 $\Pr[V_3 \leq v_3 | V_1 = v_{top}]$ を考える．

この場合、任意の 2 台目車両相対速度 r_2 に対して、3 台目車両相対速度 R_3 が $R_3 \leq v_3 - r_2 - v_{top}$ を満たさなくてはならない。そこで、 $\Pr[V_3 \leq v_3 | V_1 = v_{top}]$ は、

$$\begin{aligned} \Pr[V_3 \leq v_3 | V_1 = v_{top}] &= \int_{-\infty}^{\infty} g(r_2 | V_F = v_{top}) \cdot \left\{ \int_{-\infty}^{v_3 - v_{top} - r_2} g(r_3 | V_F = v_{top} + x_1) dr_3 \right\} dr_2 \\ &= F_3(v_3 | v_{top}) \end{aligned} \quad (6.4)$$

と書ける。車群中 4 番目の車両走行速度 V_4 が v_4 以下となる確率 $\Pr[V_4 \leq v_4 | V_1 = v_{top}] = F_4(v_4 | v_{top})$ も同様に考えると、

$$F_4(v_4 | v_{top}) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{v - v_3} g(r_2 | v_1) \cdot g(r_3 | v_2) \cdot g(r_4 | v_3) dr_2 dr_3 dr_4 \quad (6.5)$$

と書ける。ただし、

$$v_j = \begin{cases} v_{top} & \text{for } j=1 \\ v_{top} + \sum_{k=1}^{j-1} r_{k+1} & \text{for } j=2,3 \end{cases} \quad (6.6)$$

さらに、これを一般化すると、車群中 i 番目車両の走行速度分布関数 $F_i(v_i | v_{top})$ は、

$$\begin{aligned} F_i(v_i | v_{top}) &= \int_{-\infty}^{\infty} \cdots \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{v - v_{i-1}} g(r_2 | v_1) \cdot g(r_3 | v_2) \cdots g(r_i | v_{i-1}) dr_2 dr_3 \cdots dr_i \\ v_j &= \begin{cases} v_{top} & \text{for } j=1 \\ v_{top} + \sum_{k=1}^{j-1} r_{k+1} & \text{for } j=2,3,\dots,i-1 \end{cases} \end{aligned} \quad (6.7)$$

と表される。

ここで、車群内車両走行速度がある閾値 C_0 以下に減速した瞬間に Traffic Breakdown が完遂、それ以降では走行速度 C_0 以下の状態が継続され、渋滞流状態に転ずると定義する。このとき、車群先頭車両速度 v_{top} 、車群台数 k の車群がボトルネックを流出中に Traffic Breakdown が発生、渋滞流に転移する車群渋滞発生確率 $p_{bd}(v_{top}, k)$ は、

$$p_{bd}(v_{top}, k) = F_k(C_0 | v_{top}) \quad (6.8)$$

と算出される。

6.4.2 マルコフ連鎖への近似

車群渋滞発生確率は式(6.8)により算出可能であるが、前方車両速度に対する具体的な相対速度分布形は明らかになっておらず、その推定は不可能である。そこで、事象を簡略化するため、車群内車両の走行速度を離散的に扱う。

走行速度を離散的に扱うために、走行速度水準 S_0, S_1, \dots, S_n を設ける。各走行速度水準の閾値となる速度をそれぞれ C_0, C_1, \dots, C_{n-1} とする。ただし、 $0 < C_0 < C_1 < \dots < C_{n-1}$ とする。

その上で、各走行速度水準を以下のように定義する。

$$\begin{aligned} S_0 &= \{\omega | \omega \leq C_0\} \\ S_j &= \{\omega | C_{j-1} < \omega \leq C_j\} \quad \text{for } j=1, \dots, n-1 \\ S_n &= \{\omega | C_{n-1} < \omega\} \end{aligned} \quad (6.9)$$

このとき、先頭車両速度 v_{top} の車群中 i 番目車両の走行速度が走行速度水準 S_j に属する確率 $p_{S_j}^i (j=0,1,...,n)$ は i 番目車両走行速度分布関数 $F_i(v_i|v_{top})$ の関係で以下のように記述される。

$$\begin{aligned} p_{S_0}^i(v_{top}) &= F_i(C_0|v_{top}) \\ p_{S_j}^i(v_{top}) &= F_i(C_j|v_{top}) - F_i(C_{j-1}|v_{top}) \text{ for } j=1,...,n-1 \\ p_{S_n}^i(v_{top}) &= 1 - F_i(C_{n-1}|v_{top}) \end{aligned} \quad (6.10)$$

次に、先頭車両速度 v_{top} の車群中 i 番目車両の走行速度水準が $S_l (l=0,1,...,n)$ という条件の下、直後方車両 $i+1$ の走行速度水準が $S_m (m=0,1,...,n)$ に遷移する確率を $p_{S_l S_m}$ と表すと、この遷移確率は i 番目車両走行速度の確率密度関数 $f_i(v_i)$ と相対速度分布の確率密度関数 $g(r_{i+1}|v_i)$ の関係で、

$$p_{S_l S_m} = \begin{cases} \frac{\int_{C_{l-1}}^{C_l} \int_{C_{m-1}-v_i}^{C_m-v_i} f_i(v_i) \cdot g(r_{i+1}|v_i) dr_{i+1} dv_i}{\int_{C_{l-1}}^{C_l} f_i(v_i) dv_i} & (l \neq 0) \\ 1 & (l=0, m=0) \\ 0 & (l=0, m \neq 0) \end{cases} \quad (6.11)$$

と表される。ただし、 $C_{-1}=0$ 、 $C_n=\infty$ とする。

式(6.11)から、車群中車両の走行速度水準の遷移確率は前方車両走行速度水準のみに依存して決定されることが分かる。これより、走行速度を離散的に扱った場合、車群内での車両走行速度の遷移過程はマルコフ連鎖として扱えることとなる。すなわち、先頭車両走行速度 v_{top} の車群の車群中 i 台目車両走行速度分布ベクトル $\mathbf{p}(i|v_{top})$ は、走行速度遷移確率行列 \mathbf{P} と車群先頭車両速度分布ベクトル $\mathbf{p}(1|v_{top})$ を与えることで、

$$\mathbf{p}(i|v_{top}) = \mathbf{p}(1|v_{top}) \cdot \mathbf{P}^{i-1} \quad (6.12)$$

により算出可能となる。ただし、 $\mathbf{p}(1|v_{top})$ 、及び \mathbf{P} はそれぞれ式(6.13)、式(6.14)で表される。

$$\mathbf{p}(i|v_{top}) = \begin{pmatrix} p_{S_0}^i(v_{top}) \\ p_{S_1}^i(v_{top}) \\ \vdots \\ p_{S_n}^i(v_{top}) \end{pmatrix}^T \quad (6.13)$$

$$\begin{aligned}
\mathbf{P} &= \begin{pmatrix} p_{S_0 S_0} & p_{S_0 S_1} & \cdots & p_{S_0 S_n} \\ p_{S_1 S_0} & p_{S_1 S_1} & \cdots & p_{S_1 S_n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ p_{S_n S_0} & p_{S_n S_1} & \cdots & p_{S_n S_n} \end{pmatrix} \\
&= \begin{pmatrix} 1 & 0 & \cdots & 0 \\ p_{S_1 S_0} & p_{S_1 S_1} & \cdots & p_{S_1 S_n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ p_{S_n S_0} & p_{S_n S_1} & \cdots & p_{S_n S_n} \end{pmatrix}
\end{aligned} \tag{6.14}$$

ここで、先頭車両走行速度が v_{top} かつ k 台で構成される車群がボトルネックを通過中に Traffic Breakdown が発生し渋滞流状態に転移する確率 $p_{bd}(v_{top}, k)$ の導出を考える。

先頭車両走行速度が v_{top} のとき、先頭車両走行速度分布ベクトル $\mathbf{p}(l|v_{top})$ の各要素 $\{p_{S_0}^1(v_{top}), p_{S_1}^1(v_{top}), \dots, p_{S_n}^1(v_{top})\}$ は、式(6.15)で表される。

$$p_{S_j}^1(v_{top}) = \begin{cases} 1 & (\text{if } v_{top} \in S_j) \\ 0 & (\text{otherwise}) \end{cases} \text{ for } j = 0, 1, \dots, n \tag{6.15}$$

このとき、車群中 i 台目車両の走行速度分布ベクトル $\mathbf{p}(i|v_{top})$ は式(6.16)で得られる。

$$\mathbf{p}(i|v_{top}) = \mathbf{p}(1|v_{top}) \cdot \mathbf{P}^{i-1} \tag{6.16}$$

当該車群がボトルネックを流出中に Traffic Breakdown が発生した場合、それ以降の車両走行速度水準は S_0 になると仮定していることより、車群最後尾である k 台目車両の走行速度水準が S_0 である確率は、当該車群がボトルネックを流出中に Traffic Breakdown が発生する確率と同値となる。すなわち、先頭車両走行速度が v_{top} かつ k 台で構成される車群がボトルネックを通過中に Traffic Breakdown が発生する確率 $p_{bd}(v_{top}, k)$ は、

$$p_{bd}(v_{top}, k) = p_{S_0}^k(v_{top}) \tag{6.17}$$

と求められる。

以上より、観測から車群内の走行速度遷移確率行列 \mathbf{P} を求めることで、車群渋滞発生確率が算出可能となる。

6.5 渋滞発生確率推定手法の構築

本節では、実観測データより車群内車両走行速度遷移確率行列を算出するとともに、区間終端がボトルネックとなっている高速道路片側1車線区間に本推定手法を適用し、ボトルネックへの流入交通流率に対する渋滞発生確率算定手法を構築する。

6.5.1 走行速度遷移確率行列の算定

走行速度遷移確率行列の算定に当たり、図 6.1 に示す東海北陸自動車道上り線 70.4kp 地点を対象にビデオカメラによる交通流観測を行った。以下に取得したデータの概要をまとめる。

- (1) データ種別：ビデオ画面内に 40m 離れた 2 地点を特定し、その地点間の通過所要時

間を計測することにより走行速度を、そして、特定した 2 地点の内、上流に位置する地点の通過時刻に基づいて車頭時間を算定する。

- (2) 観測日時：2004 年 7 月 18 日（日）13:00-17:50、及び 19 日（月、祝）13:20-18:00.
- (3) 取得データ：車両通過時刻（時分秒）、車種（小型 or 大型）、速度（0.1km/h 単位）、車頭時間（0.1 秒単位）.
- (4) 観測時の天候：両日共、観測時間中の降雨は観測されなかった.
- (5) 備考：19 日の 15:45 以降では 700m 下流に位置する平山トンネルをボトルネックとする渋滞が発生している．18 日、及び 19 日の 5 分間交通量、5 分間平均速度の変動図を図 6.2、図 6.3 にまとめる．

走行速度遷移確率行列の算定に当たり、車群判定基準は第 3 章の結果に倣い、車頭時間が 4.0 秒未満の車両を追従走行車両、4.0 秒以上の車両を自由走行車両と定義し、自由走行車両を先頭とする追従走行車両の連なりを車群と判定した．自由流状態を対象に、車群中車両の前方車両走行速度－相対速度の関係を図 6.4 に示す．ただし、各観測日共に、観測を開始してから走行速度 40[km/h]以下の車両が 2 台連続で観測されるまでを自由流状態と定義した．

また、走行速度水準として、 $C_0=40$ [km/h]、 $C_1=50$ [km/h]、 $C_2=60$ [km/h]、 $C_3=70$ [km/h]、 $C_4=80$ [km/h]、 $C_5=90$ [km/h]、 $C_6=100$ [km/h]、 $C_7=110$ [km/h]と設定し、前方車両走行速度水準毎の相対速度統計値を表 6.1 に整理する．これより、前方車両走行速度が 90[km/h]以上の場合、相対速度の平均値は負値、60[km/h]～90[km/h]では正值を取り、さらに走行速度水準 60[km/h]より低くなると再び相対速度平均値が負値に転じるという傾向が見られる．これは第 5 章で確認した、片側 2 車線高速道路ボトルネック上流地点の追越車線での観測結果と同じ傾向である．

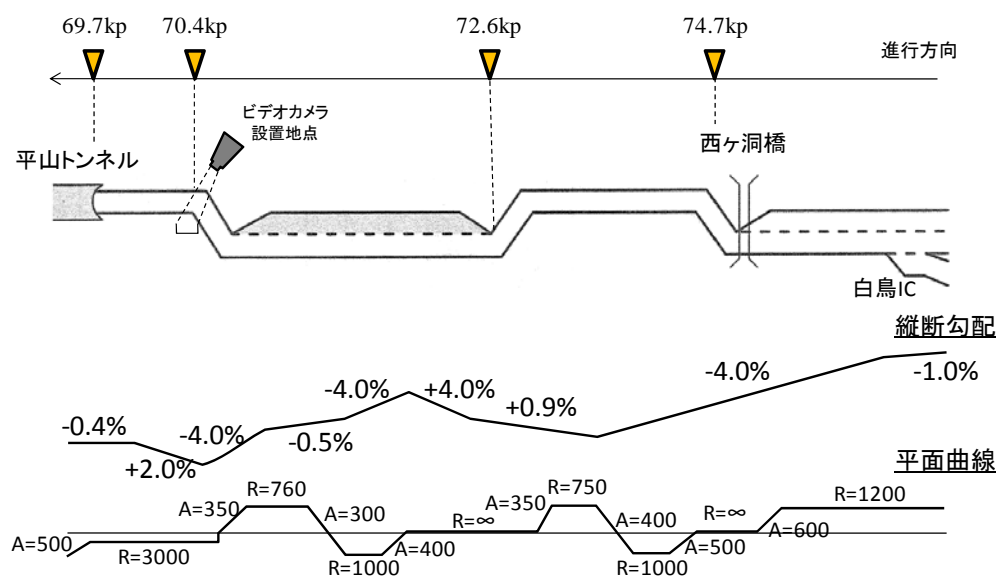


図 6.1 観測対象区間概要図

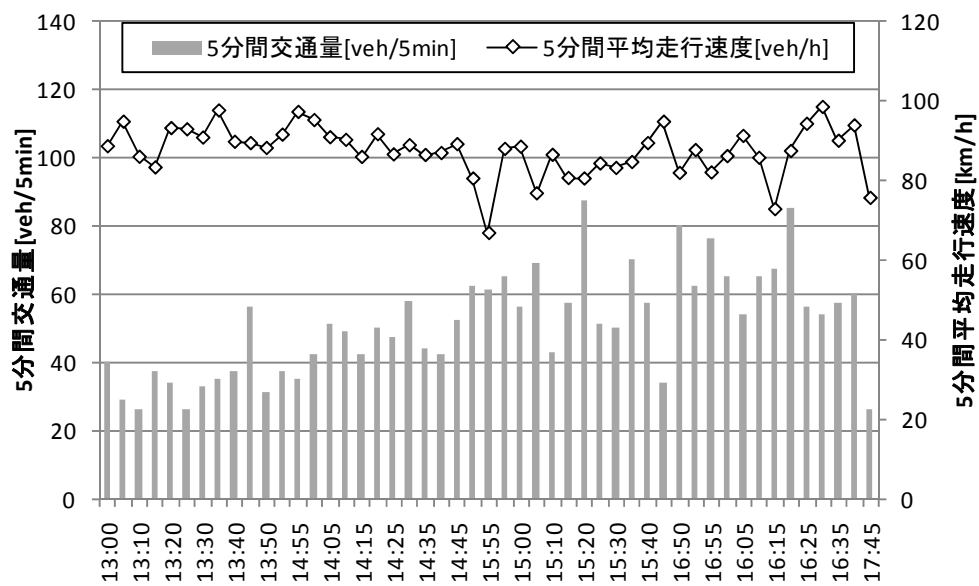


図 6.2 5 分間交通量－5 分間平均走行速度変動図（7 月 18 日）

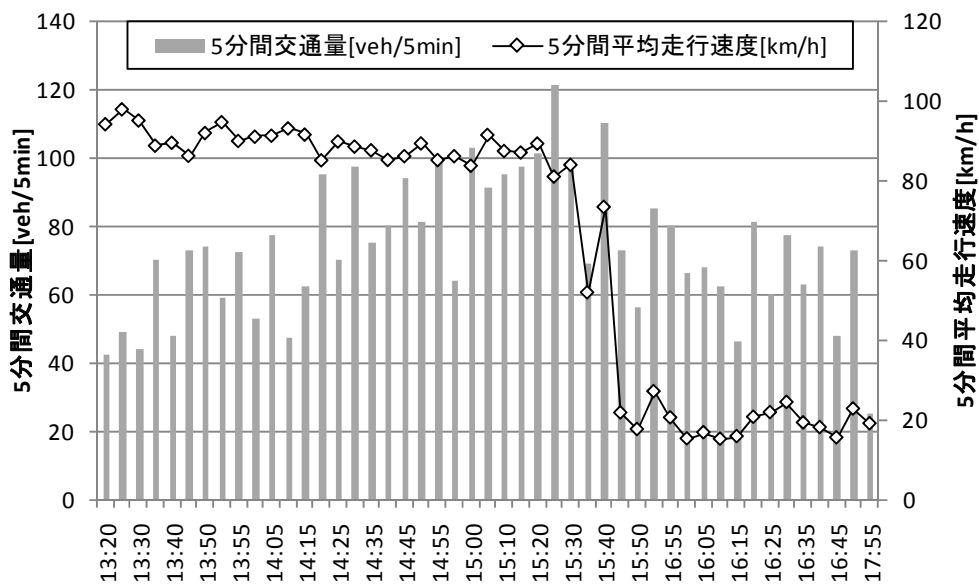


図 6.3 5 分間交通量－5 分間平均走行速度変動図（7 月 19 日）

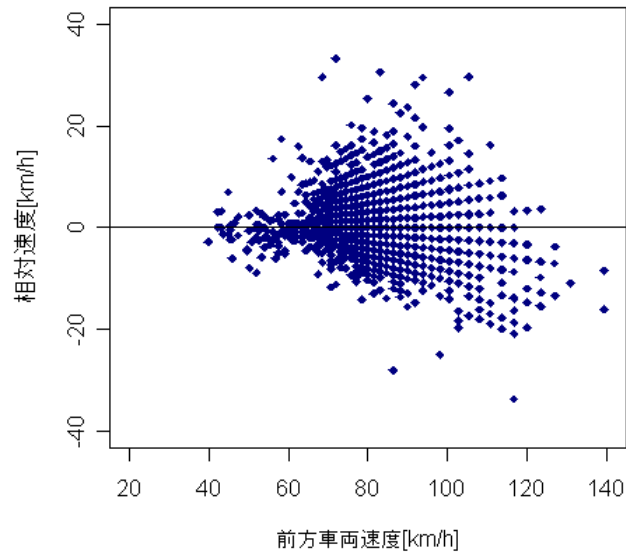


図 6.4 東海北陸自動車道 70.4kp 地点 前方車両速度－相対速度散布図

表 6.1 前方車両走行速度水準別相対速度分布統計値

走行速度水準	40-50	50-60	60-70	70-80	80-90	90-100	100-110	110-
N	19	49	162	759	1,539	1,001	296	19
Mean [km/h]	-0.35	-0.32	1.49	1.05	0.23	-0.66	-1.83	-6.04
S.D. [km/h]	3.18	4.48	4.77	4.74	4.94	5.15	6.68	6.00

次に、前方車両走行速度水準間での相対速度分布に差異があることを確認する。まず、走行速度水準間の分散に差異があることを確かめるため、バートレット検定を適用した。その結果、

$$K_B = 72.18, df = 7, p \text{ 値} = 5.36\text{E-}13$$

を得た。すなわち、前方車両走行速度水準間で相対速度分散に有意な差が存在することが示唆された。続いて、各走行速度水準間での相対速度母中央値の差異を確認するため、クラスカル＝ワリス検定を行った。その結果、

$$K_{KW} = 127.95, df = 7, p \text{ 値} = 2.20\text{E-}16$$

となり、走行速度水準間で相対速度の母中央値に有意な差があることが確認された。

この結果より、走行速度水準として $C_0=40[\text{km/h}]$, $C_1=50[\text{km/h}]$, $C_2=60[\text{km/h}]$, $C_3=70[\text{km/h}]$, $C_4=80[\text{km/h}]$, $C_5=90[\text{km/h}]$, $C_6=100[\text{km/h}]$, $C_7=110[\text{km/h}]$ を採用することで、前方車両走行速度水準毎に相対速度分布に有意な差異が生じることが確認された。

以上を踏まえ、実観測データに基づき、車群内車両走行速度遷移確率行列を算出した。その結果を式(6.18)に示す。以降、この走行速度遷移確率行列に基づき、渋滞発生確率の推定を行う。

$$\begin{aligned}
\mathbf{P} &= \begin{pmatrix} p_{S_0S_0} & p_{S_0S_1} & \cdots & p_{S_0S_8} \\ p_{S_1S_0} & p_{S_1S_1} & \cdots & p_{S_1S_8} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ p_{S_8S_0} & p_{S_8S_1} & \cdots & p_{S_8S_8} \end{pmatrix} \\
&= \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0.0476 & 0.8095 & 0.0952 & 0 & 0.0476 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.1094 & 0.7813 & 0.0938 & 0.0156 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.0054 & 0.0435 & 0.6467 & 0.2826 & 0.0163 & 0.0054 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.0010 & 0.0714 & 0.6945 & 0.2231 & 0.0080 & 0.0020 & 0 \\ 0 & 0 & 0.0006 & 0.0006 & 0.1585 & 0.6972 & 0.1300 & 0.0093 & 0.0037 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0.0026 & 0.2718 & 0.5910 & 0.1240 & 0.0105 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.0465 & 0.2957 & 0.5615 & 0.0963 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.0080 & 0.0560 & 0.3520 & 0.5840 \end{pmatrix} \quad (6.18)
\end{aligned}$$

6.5.2 渋滞発生確率の計算フロー

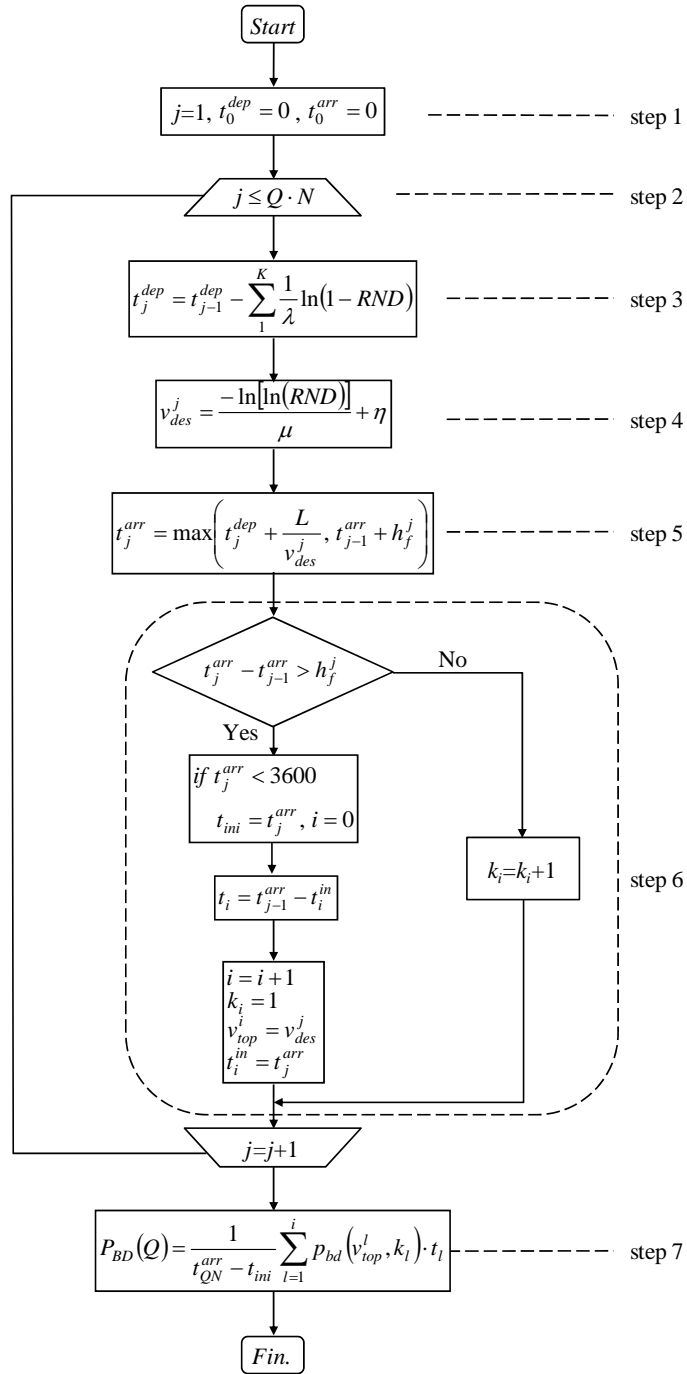
渋滞発生確率の推定に当たり，下流端がボトルネックである高速道路片側1車線区間を想定する．その上で，第4章で構築した車群形成モデルを用い，片側1車線区間長，希望走行速度分布，ボトルネックへの流入交通流率を所与として対象区間終端での車群形成状況を模擬する．さらに，車群形成モデル内で形成された車群について，車群先頭車両速度水準，車群台数毎に車群渋滞発生確率を式(6.17)に基づいて算出，求めた車群渋滞発生確率を式(6.1)に代入することにより，所与とした片側1車線区間長，希望走行速度分布，流入交通流率に対する単位時間当たりの渋滞発生確率を推定する．

具体的には，図6.5に示す手順で渋滞発生確率を算出する．以下，フロー中の各stepについて詳説する．

- step 1 用いる変数の初期化を行う．ただし， i は対象区間下流端で観測される車群番号， j は発生された車両番号， t_j^{dep} は車両 j の対象区間上流端からの流入時刻， t_j^{arr} は車両 j の対象区間下流端からの流出時刻をそれぞれ表す．
- step 2 シミュレーション中では N 時間分だけ車両を発生させる．すなわち，流入交通流率を Q [veh/h]とすると，総計で $Q \cdot N$ 台の車両を発生させることとなる．
- step 3 区間上流端での車両到着過程にアーラン到着を仮定し，車両 j の対象区間流入時刻を算出する．ただし， K はアーラン分布の位相を， λ は式(6.19)で算出されるアーラン分布のパラメータを， RND は0-1の間に一様分布する乱数を表す．

$$\frac{1}{\lambda} = \frac{3600}{K \cdot Q} \quad (6.19)$$

- step 4 車両 j に対し，希望走行速度を与える．ただし，希望走行速度分布はロケーションパラメータ η ，スケールパラメータ μ のガンベル分布に従うとする．
- step 5 車両 j の対象区間流出時刻を算出する．ただし，対象区間長を L ，車両 j の追従時



- i : 車群番号
 j : 車両番号
 t_j^{dep} : 車両 j の対象区間流入時刻
 t_j^{arr} : 車両 j の対象区間流出時刻
 v_{des}^j : 車両 j の希望走行速度
 h_f^j : 車両 j の追従時車頭時間
 t_{ini} : 解析開始時刻
 t_i^{in} : 車群 i のボトルネック流出開始時刻
 t_i : 車群 i のボトルネック通過所要時間
 v_{top}^i : 車群 i の先頭車両走行速度
 k_i : 車群 i の車両台数

図 6.5 渋滞発生確率の計算フロー

車頭時間を h_f^j とする。

step 6 対象区間で形成される車群 i の車群先頭車両速度 v_{top}^i ，車群台数 k_i ，ボトルネックを通過するのに要する時間 t_i を算出する．具体的な所作を以下にまとめる．

車両 j が対象区間下流端で自由走行状態にあると判別された場合，車両 j は車群 $i+1$ の先頭車両となり，車群 i のボトルネック通過所要時間 t_i ，及び車群 $i+1$ の流出開始時刻 t_{i+1}^m ，車群 $i+1$ の車群先頭車両走行速度 v_{top}^{i+1} が記録される．一方で，車両 j が追従走行状態にある場合は，車群 i の車群台数 k_i が 1 台加算される．ただし，定常状態にある交通流を対象とするため，シミュレーション開始後 1 時間経過した時点からの車群形成状況を対象に集計を行う．ここで， t_{ini} は集計対象となる最初の車群先頭車両が対象区間下流端から流出した時刻を表す．

step 7 対象区間下流端で観測された全ての車群 l ($1 \leq l \leq i$) を対象に，式(6.17)に従って車群渋滞発生確率 $p_{bd}(v_{top}^l, k_l)$ を算出する．その上で，式(6.1)に従って，流入交通流率 Q に対する単位時間当たりの渋滞発生確率 $P_{BD}(Q)$ を求める．

6.6 渋滞発生確率の推定

本節では，6.5 で構築した渋滞発生確率算出フローを用い，下流端がボトルネックである高速道路片側 1 車線区間での流入交通流率と渋滞発生確率の関係を求める．

6.6.1 渋滞発生確率推定のための条件設定

渋滞発生確率の推定に当たり，シミュレーション内では 1,000 時間に渡り車両を発生させる．また，対象区間上流端への車両到着パターンとして，位相 $K=2$ のアラン到着を仮定する．さらに，希望走行速度分布は，第 4 章において当該片側 1 車線区間の上流に位置する区間を対象に推定された結果を参照し， $(\eta, \mu) = (90.7, 0.097)$ のガンベル分布に従うとする．車群内車両の車頭時間 h_f は走行速度によらず全車両とも均一に 2.0 秒として与える．このとき，対象区間ボトルネックの交通容量は 1,800[veh/h] になり，流入交通流率が 1,800[veh/h] を超える場合は，常に渋滞が発生すると予想される．

6.6.2 渋滞発生確率推定結果

上述のパラメータ設定の下，対象片側 1 車線区間長を 2.5km, 5.0km, 10.0km と設定し，流入交通流率を 500 [veh/h] から 1,900 [veh/h] まで変動させ，それぞれの状況での渋滞発生確率を算出した．その結果を表 6.2，及び図 6.6 に示す．

これより，流入交通流率が 500[veh/h] と低い場合にはほぼ渋滞は発生しないが，流入交通流率が増加するに連れて渋滞発生確率も増加，特にボトルネック交通容量である 1,800 [veh/h] に近づくと渋滞発生確率の増加率も増大し，1,800[veh/h] に達して以降は 100% の確率で渋滞が発生することが確認できる．すなわち，渋滞発生時交通量の変動する現象を，本研究の枠組みで示すことができた．

次に，片側 1 車線区間長と渋滞発生確率の関係に着目すると，片側 1 車線区間長が長い

表 6.2 片側 1 車線区間長に対する渋滞発生確率推定値

Q [veh/h]	2.5km	5km	10km
500	0.000	0.000	0.000
1,000	0.001	0.002	0.005
1,250	0.002	0.006	0.012
1,500	0.010	0.018	0.034
1,600	0.020	0.033	0.056
1,700	0.061	0.085	0.126
1,710	0.074	0.094	0.140
1,720	0.086	0.113	0.160
1,730	0.107	0.134	0.184
1,740	0.139	0.163	0.215
1,750	0.175	0.204	0.270
1,760	0.243	0.273	0.349
1,770	0.329	0.373	0.430
1,780	0.484	0.531	0.577
1,790	0.710	0.730	0.750
1,800	0.998	0.998	0.998
1,810	1.000	1.000	1.000
1,850	1.000	1.000	1.000
1,900	1.000	1.000	1.000

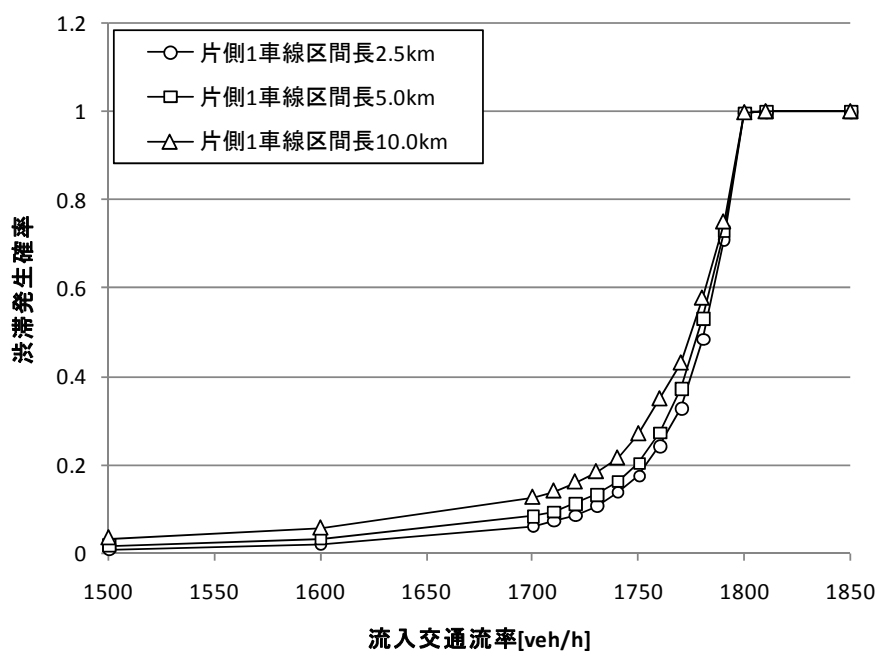


図 6.6 片側 1 車線区間長と渋滞発生確率の関係

ほど，流入交通流率に対する渋滞発生確率が高くなっていることが読み取れる．これは，片側 1 車線区間長が長くなることにより，対象区間で形成される車群が大きくなるためであると考えられる．この結果は高速道路暫定 2 車線区間の交通容量に関する既往研究¹³⁾で得られている知見と一致し，本手法の妥当性が示された．

6.7 片側1車線区間ボトルネックにおける渋滞対策効果検討

本節では、構築した渋滞発生確率推定モデルを用いることにより、高速道路片側1車線区間ボトルネックにおける渋滞対策、及びその効果について検討を行う。

6.7.1 希望走行速度分布と渋滞発生確率の関係

希望走行速度分布の差異が渋滞発生確率に与える影響を調べるため、希望走行速度分布について複数のパラメータセットを設定し、渋滞発生確率を推定する。希望走行速度分布はガンベル分布 $(\eta, \mu)=(90.7, 0.097)$ （平均 96.6[km/h]，標準偏差 13.2[km/h]に相当）を基準として、(1) 平均のみ基準より高い分布 $(\eta, \mu)=(100.0, 0.097)$ （平均 105.9[km/h]，標準偏差 13.2[km/h]に相当），(2) 分散のみ基準より高い分布 $(\eta, \mu)=(87.6, 0.064)$ （平均 96.6[km/h]，標準偏差 20.0[km/h]に相当）について、片側1車線区間長を 5.0km に設定の上、それぞれ算出した。その結果を表 6.3、及び図 6.7 に示す。

これより、希望走行速度分布の平均値が高くなると、渋滞発生確率が減少すること、そして希望走行速度分布の分散が大きくなると、渋滞発生確率が増加することが確認できる。特に分散を大きくした場合、流入交通流率が低い場合でも高い確率で渋滞が発生することが確認できる。

この理由として、希望走行速度分布の平均値が高くなった場合、各車両が片側1車線区間に流入してから流出するまでにかかる所要時間が平均的に短くなることが挙げられる。すなわち、希望走行速度分布の平均値を上昇させることによって片側1車線区間長を短くするのと同様の効果があるものと考えられる。

一方、希望走行速度分布の分散を大きくした場合、流入交通流率が低い場合でも高い確率で渋滞が発生するのは、各車両の希望走行速度のばらつきが大きくなるため、車群が形成されやすくなることが原因であると考えられる。その際、分散を大きくしたことにより極めて走行速度の低い車両の発生する確率が高くなる。具体的には、図 6.8 に示す通り基準として用いた希望走行速度分布では、希望走行速度 70[km/h]以下の車両が発生する割合はほぼ 0 であるのに対し、(2)の分散のみを大きくした希望走行速度分布を用いると約 5% の割合で発生することが分かる。さらに、式(6.18)で与えた車群内車両走行速度遷移確率行列を用いた場合、先行車両走行速度が 60[km/h]以下の場合、車群内の走行速度が減速する傾向を持ちやすい。そのため、図 6.9 に示す通り、車群台数が同じであっても車群中先頭車両速度が低くなると渋滞発生確率が高くなることが確認できる。特に車群中先頭車両走行速度が 60[km/h]以下の場合、車群渋滞発生確率が極めて高くなることが分かる。

以上の理由により、希望走行速度分布の分散を大きくした場合、希望走行速度の極めて低い車両が車群の先頭となり、渋滞の発生を誘発するために、他の希望走行速度分布との比較で渋滞発生確率が高く推定されたと考えられる。

これより、高速道路片側1車線区間における渋滞対策として、

- (1) ボトルネック直前の片側1車線区間を短縮化すること

表 6.3 希望走行速度分布に対する渋滞発生確率

Q [veh/h]	$(\eta, \mu) = (90.7, 0.097)$	$(\eta, \mu) = (100.0, 0.097)$	$(\eta, \mu) = (87.6, 0.064)$
500	0.000	0.000	0.003
1,000	0.002	0.001	0.020
1,250	0.006	0.003	0.041
1,500	0.018	0.011	0.085
1,600	0.033	0.023	0.122
1,700	0.085	0.067	0.213
1,710	0.094	0.082	0.234
1,720	0.113	0.093	0.256
1,730	0.134	0.120	0.287
1,740	0.163	0.145	0.321
1,750	0.204	0.188	0.352
1,760	0.273	0.254	0.416
1,770	0.373	0.336	0.507
1,780	0.531	0.507	0.623
1,790	0.730	0.687	0.809
1,800	0.998	0.993	0.996
1,810	1.000	1.000	1.000
1,850	1.000	1.000	1.000
1,900	1.000	1.000	1.000

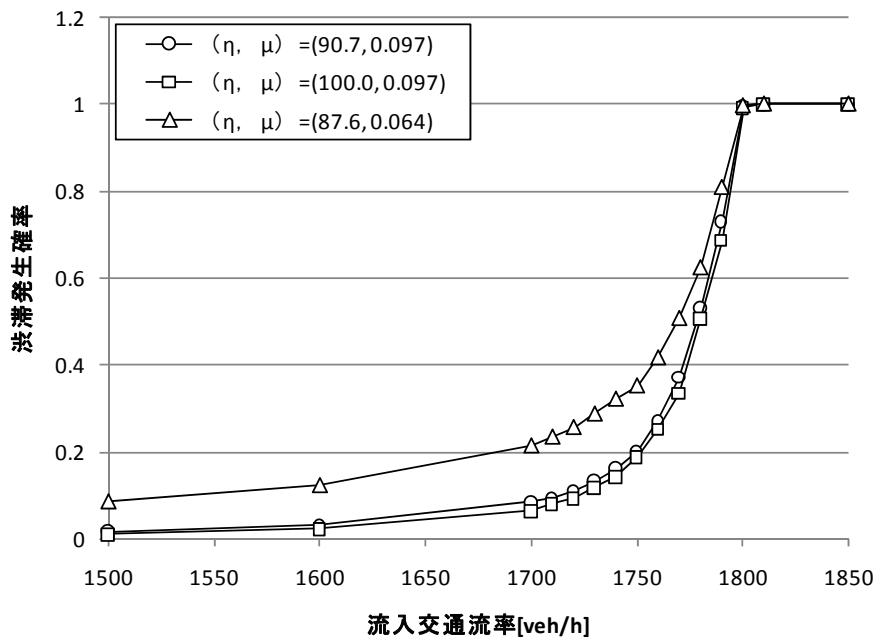


図 6.7 希望走行速度分布別の渋滞発生確率

- (2) 対象区間内での各車両の希望走行速度を高くすること
 (3) 対象区間内での各車両の希望走行速度分布のばらつきを小さくすること
 が挙げられる。

(1)については、渋滞対策としてボトルネック上流側に付加車線を設置する際、ボトルネックから付加車線設置区間までの片側1車線区間長が極力短くなるように設置するなど、

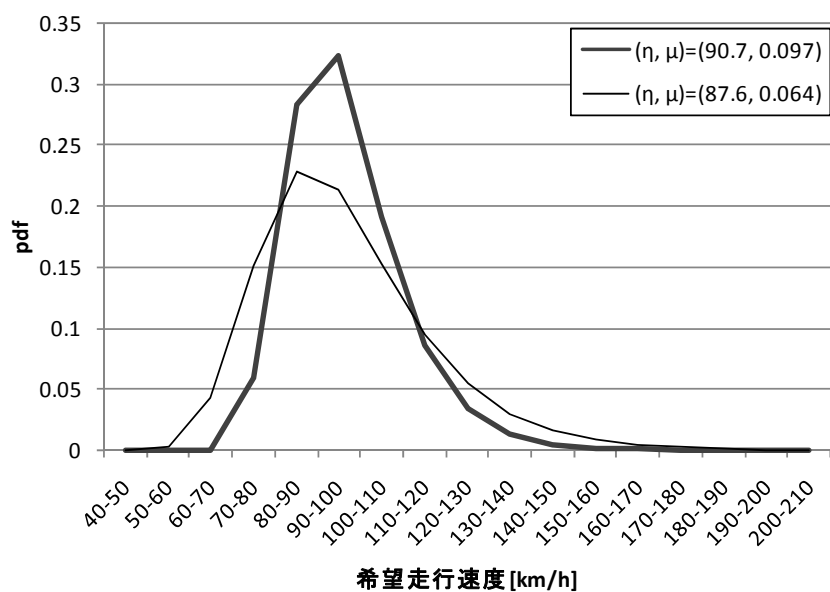


図 6.8 希望走行速度分布の例

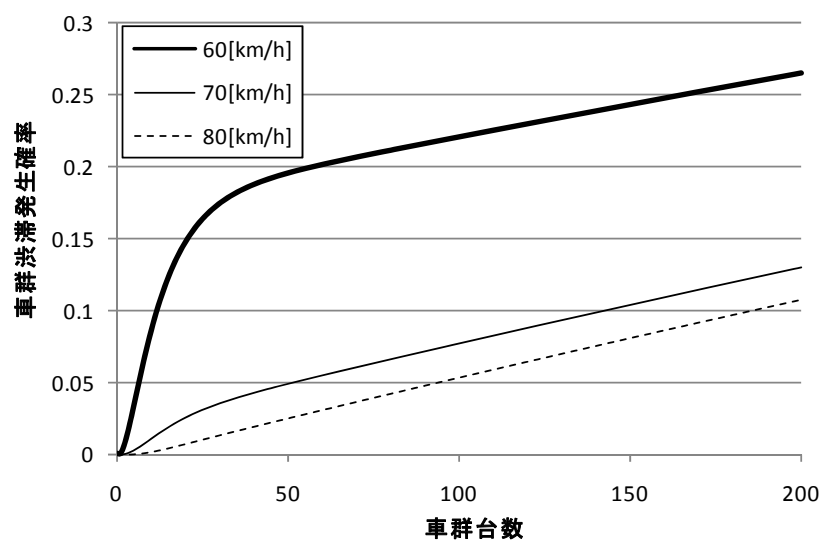


図 6.9 車群先頭車両走行速度別の車群渋滞発生確率

付加車線設置基準に対する指針になると考えられる。

(2)については、例えば車線幅員を増幅することや、サグやトンネル入り口など減速を強いられる箇所に関しては、速度上昇を促す情報を提供することで渋滞発生確率を抑制する効果が期待できる。

最後に(3)については、例えば各車両に対し規制速度の遵守を徹底するなど、車両毎の希望走行速度のばらつきを抑えることで車群の形成を抑制、渋滞発生を軽減させる効果があると考えられる。

6.7.2 ペースカー導入効果の検証

前項の知見を勘案すると、車群の形成を抑制、もしくは車群を分散させることで渋滞の発生を軽減させる効果があることが示された。このことより、交通流に対して一定の速度で走行するペースカーを混入させることにより車群を分散させ、渋滞対策効果を生むと考えられる。以下では、

- (1) 一定の速度で走行するペースカーを混入させる、
- (2) 一定の割合で混在する大型車などにペースカーの役割を持たせ、大型車に一定速度での走行を課す、

の2つのシナリオを想定の上、各施策の効果について検証する。

(1) ペースカーを外部から混入させる場合

本施策では、交通流に対して、一定の走行速度での走行を強いた車両を一定時間間隔で外部から混入させることにより、車群分散効果と渋滞抑制効果を狙う。以下では、片側1車線区間長を5.0kmと想定し、10分間に1台の割合、5分間に1台の割合、1分間に1台の割合でペースカーを混入させるという3つのケースを考える。この場合、外部から車両を追加して走行させているため、与えられた流入交通流率に対して、それぞれ6[veh/h]、12[veh/h]、60[veh/h]ずつ需要交通流率が増加することとなる。ペースカーの走行速度を60[km/h]、70[km/h]、80[km/h]と変動させ、流入交通流率と渋滞発生確率の関係を求めた。比較のため、ペースカーを導入しない場合の流入交通流率と渋滞発生確率の関係と合わせて、表6.4～表6.6、及び図6.10～図6.12にその結果を示す。

表 6.4 10 分間に 1 台の割合でペースカーを混入させた場合

Q [veh/h]	ペースカー走行速度			
	ペースカーなし	60 [km/h]	70 [km/h]	80 [km/h]
500	0.000	0.009	0.000	0.000
1,000	0.002	0.035	0.004	0.002
1,250	0.006	0.067	0.010	0.006
1,500	0.018	0.160	0.029	0.018
1,600	0.033	0.233	0.050	0.034
1,700	0.085	0.294	0.112	0.091
1,710	0.094	0.302	0.125	0.101
1,720	0.113	0.313	0.141	0.125
1,730	0.134	0.329	0.165	0.150
1,740	0.163	0.360	0.201	0.183
1,750	0.204	0.391	0.252	0.236
1,760	0.273	0.461	0.341	0.312
1,770	0.373	0.551	0.447	0.431
1,780	0.531	0.704	0.662	0.617
1,790	0.730	0.917	0.911	0.930
1,800	0.998	1.000	0.999	0.999
1,810	1.000	1.000	1.000	1.000
1,850	1.000	1.000	1.000	1.000
1,900	1.000	1.000	1.000	1.000

表 6.5 5 分間に 1 台の割合でペースカーを混入させた場合

Q [veh/h]	ペースカー走行速度			
	ペースカーなし	60 [km/h]	70 [km/h]	80 [km/h]
500	0.000	0.018	0.001	0.000
1,000	0.002	0.070	0.007	0.002
1,250	0.006	0.127	0.015	0.006
1,500	0.018	0.193	0.039	0.019
1,600	0.033	0.212	0.060	0.036
1,700	0.085	0.254	0.111	0.101
1,710	0.094	0.268	0.127	0.115
1,720	0.113	0.285	0.147	0.141
1,730	0.134	0.306	0.179	0.168
1,740	0.163	0.343	0.223	0.215
1,750	0.204	0.398	0.279	0.287
1,760	0.273	0.488	0.383	0.392
1,770	0.373	0.631	0.552	0.541
1,780	0.531	0.849	0.768	0.778
1,790	0.730	0.998	0.999	0.998
1,800	0.998	1.000	1.000	1.000
1,810	1.000	1.000	1.000	1.000
1,850	1.000	1.000	1.000	1.000
1,900	1.000	1.000	1.000	1.000

表 6.6 1 分間に 1 台の割合でペースカーを混入させた場合

Q [veh/h]	ペースカー走行速度			
	ペースカーなし	60 [km/h]	70 [km/h]	80 [km/h]
500	0.000	0.023	0.002	0.000
1,000	0.002	0.078	0.012	0.002
1,250	0.006	0.110	0.019	0.006
1,500	0.018	0.147	0.031	0.023
1,600	0.033	0.176	0.050	0.052
1,700	0.085	0.371	0.244	0.276
1,710	0.094	0.426	0.349	0.365
1,720	0.113	0.565	0.482	0.503
1,730	0.134	0.774	0.757	0.772
1,740	0.163	0.995	0.953	0.996
1,750	0.204	1.000	1.000	1.000
1,760	0.273	1.000	1.000	1.000
1,770	0.373	1.000	1.000	1.000
1,780	0.531	1.000	1.000	1.000
1,790	0.730	1.000	1.000	1.000
1,800	0.998	1.000	1.000	1.000
1,810	1.000	1.000	1.000	1.000
1,850	1.000	1.000	1.000	1.000
1,900	1.000	1.000	1.000	1.000

これより、いずれのケースでもペースカーを導入することで渋滞が発生しやすくなるとの結果が得られた。これは、ペースカーによる車群分散効果以上に、外部からペースカーを追加することによる交通流量の増加という負の効果が際だったものと考えられる。このことは、混入させるペースカーの頻度を 10 分間に 1 台から、5 分間に 1 台、1 分間に 1 台と高くするに連れて、渋滞発生確率がほぼ 1.0 となる流入交通流率の最小値が小さくなることから明らかである。

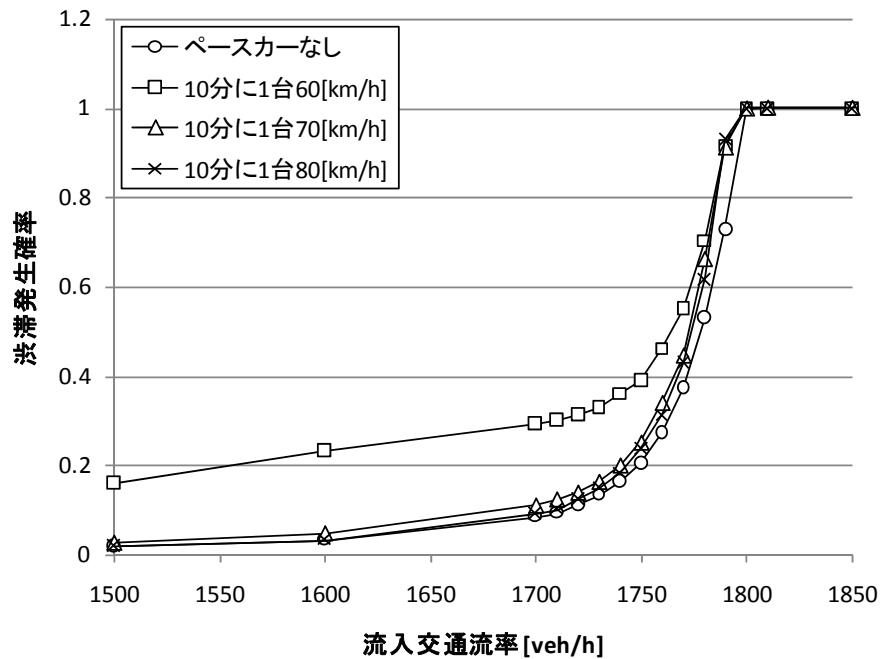


図 6.10 10 分間に 1 台の割合でペースカーを混入させた場合

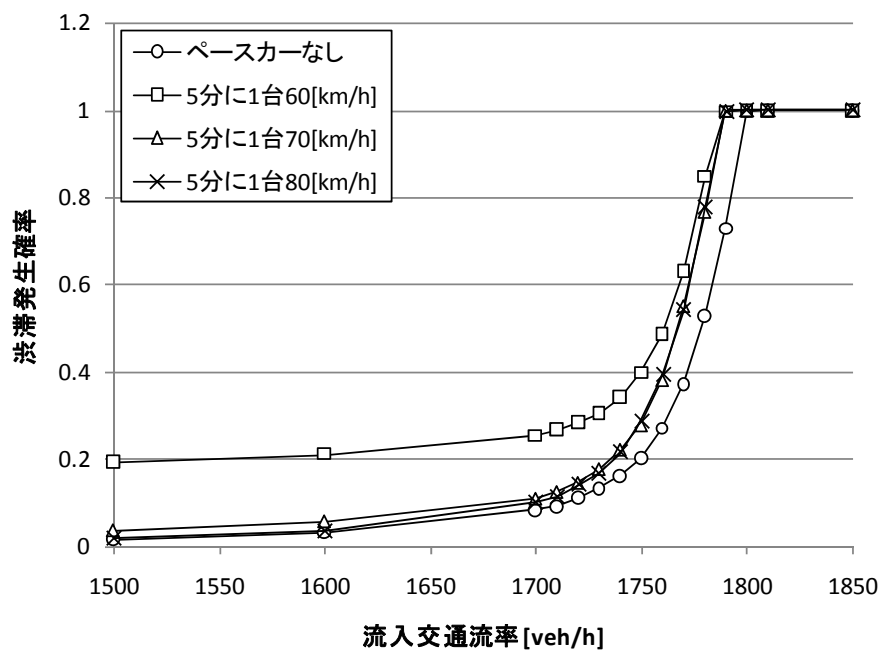


図 6.11 5 分間に 1 台の割合でペースカーを混入させた場合

また、図よりペースカーの走行速度を 60[km/h]とした場合、他のケースと比べて極めて渋滞発生確率が高くなっていることが確認できる。これは、図 6.9 に示したように 車群先頭車両が 60[km/h]以下の場合、その後方車両の相対速度は負値を取る傾向にあり、小さい車群でも渋滞発生確率が高くなるためであると考えられる。

以上より、ペースカーを一定間隔で外部から混入させた場合、ペースカーによる渋滞軽減効果は期待できないことが確認された。

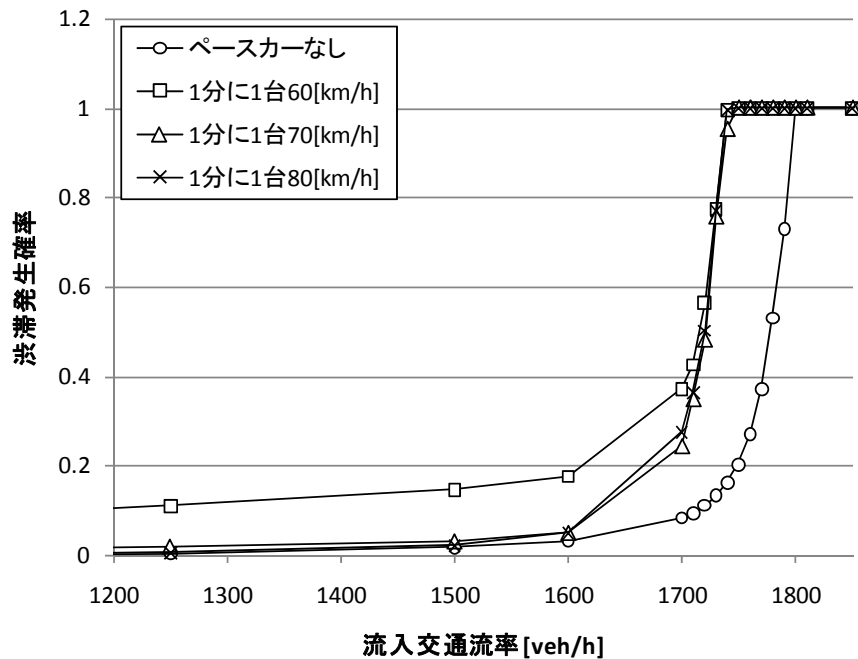


図 6.12 1 分間に 1 台の割合でペースカーを混入させた場合

(2) 一定割合で混在する車両をペースカーとして用いる場合

本施策では、例えば大型車などのある一定の割合で混入する車両に一定走行速度での走行を課すことによりペースカーの役割を果たさせることで渋滞抑制効果を持つか否かの検証を行う。以下では、片側 1 車線区間長を 5.0km と想定し、10 台に 1 台の割合でランダムにペースカーが混在する場合、及び 15 台に 1 台の割合でペースカーが混在する場合の 2 つのケースについて、流入交通流率と渋滞発生確率の関係を導出する。また、ペースカーとなる大型車の走行速度に関しては 60[km/h]、70[km/h]、80[km/h]と変動させ、その効果の違いを検討する。ペースカーを導入しない場合の流入交通流率と渋滞発生確率の関係と合わせて、表 6.7、表 6.8、及び図 6.13、図 6.14 にその結果を示す。

これより、両ケース共に、ペースカーに 70[km/h]での走行を課することで、流入需要交通流率 1,700[veh/h]以上のとき、渋滞発生確率がペースカーを導入しない場合と比較して、15 台に 1 台の割合の時で約 2%、10 台に 1 台の割合の時で約 3%程度小さくなっていることが分かる。一方、ペースカーの走行速度を 60[km/h]に設定した場合、渋滞発生確率が大きく上昇している。これは、図 6.9 に示した通り、車群先頭車両走行速度 60[km/h]以下の車群は設定した車群内車両走行速度遷移確率行列の関係で渋滞状態へと遷移しやすいためである。また、ペースカーの走行速度を 80[km/h]とした場合、ペースカーより低い希望走行速度を持つ車両が多く存在するため、ペースカーが追従走行を強いられ、車群分散効果が発揮できなくなるため、渋滞抑制効果が見られなかったと考えられる。

以上より、大型車などのある一定の割合で混入する車両に 70[km/h]での走行を課すことにより、車群を分散させ、渋滞の発生を抑制する効果があることが確認された。特に走行

速度 70[km/h]はデータ取得区間の規制速度と一致する。これより，大型車に対し規制速度の遵守を徹底させることで，渋滞対策効果を生むことが明らかとなった。

表 6.7 15 台に 1 台の割合でペースカーが混在している場合

Q [veh/h]	ペースカー走行速度			
	ペースカーなし	60 [km/h]	70 [km/h]	80 [km/h]
500	0.000	0.021	0.001	0.000
1,000	0.002	0.063	0.008	0.001
1,250	0.006	0.082	0.013	0.004
1,500	0.018	0.112	0.021	0.015
1,600	0.033	0.136	0.031	0.030
1,700	0.085	0.190	0.069	0.083
1,710	0.094	0.199	0.079	0.096
1,720	0.113	0.213	0.098	0.112
1,730	0.134	0.235	0.115	0.135
1,740	0.163	0.261	0.139	0.161
1,750	0.204	0.288	0.189	0.207
1,760	0.273	0.359	0.246	0.269
1,770	0.373	0.428	0.351	0.357
1,780	0.531	0.577	0.487	0.535
1,790	0.730	0.726	0.683	0.723
1,800	0.998	0.995	0.995	0.969
1,810	1.000	1.000	1.000	1.000
1,850	1.000	1.000	1.000	1.000
1,900	1.000	1.000	1.000	1.000

表 6.8 10 台に 1 台の割合でペースカーが混在している場合

Q [veh/h]	ペースカー走行速度			
	ペースカーなし	60 [km/h]	70 [km/h]	80 [km/h]
500	0.000	0.021	0.001	0.000
1,000	0.002	0.074	0.009	0.002
1,250	0.006	0.100	0.016	0.005
1,500	0.018	0.129	0.026	0.016
1,600	0.033	0.149	0.036	0.031
1,700	0.085	0.198	0.073	0.081
1,710	0.094	0.207	0.083	0.095
1,720	0.113	0.221	0.097	0.114
1,730	0.134	0.240	0.115	0.133
1,740	0.163	0.269	0.146	0.162
1,750	0.204	0.308	0.189	0.201
1,760	0.273	0.353	0.247	0.271
1,770	0.373	0.447	0.342	0.358
1,780	0.531	0.550	0.509	0.527
1,790	0.730	0.764	0.699	0.742
1,800	0.998	0.984	1.000	1.000
1,810	1.000	1.000	1.000	1.000
1,850	1.000	1.000	1.000	1.000
1,900	1.000	1.000	1.000	1.000

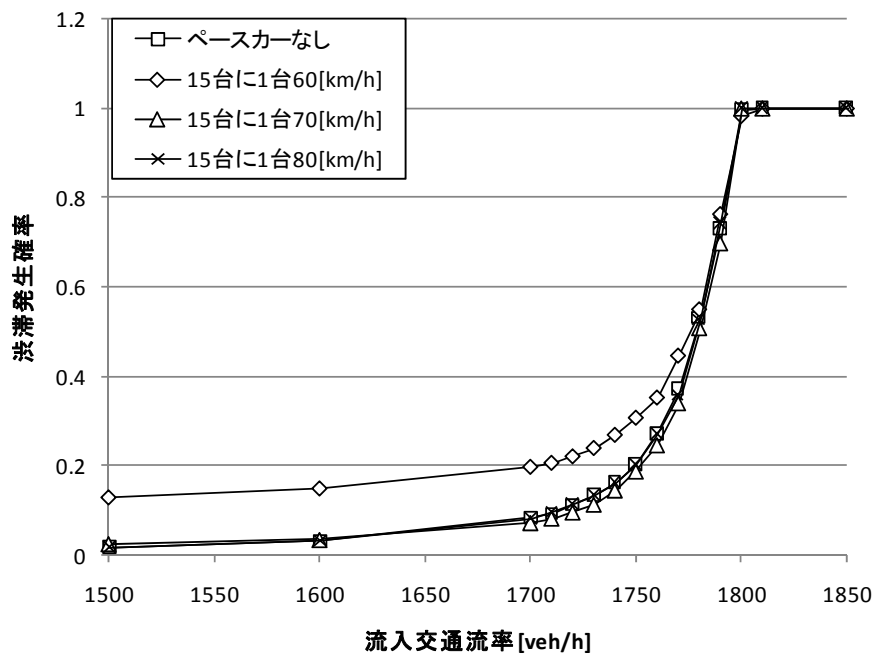


図 6.13 15 台に 1 台の割合でペースカーが混在している場合

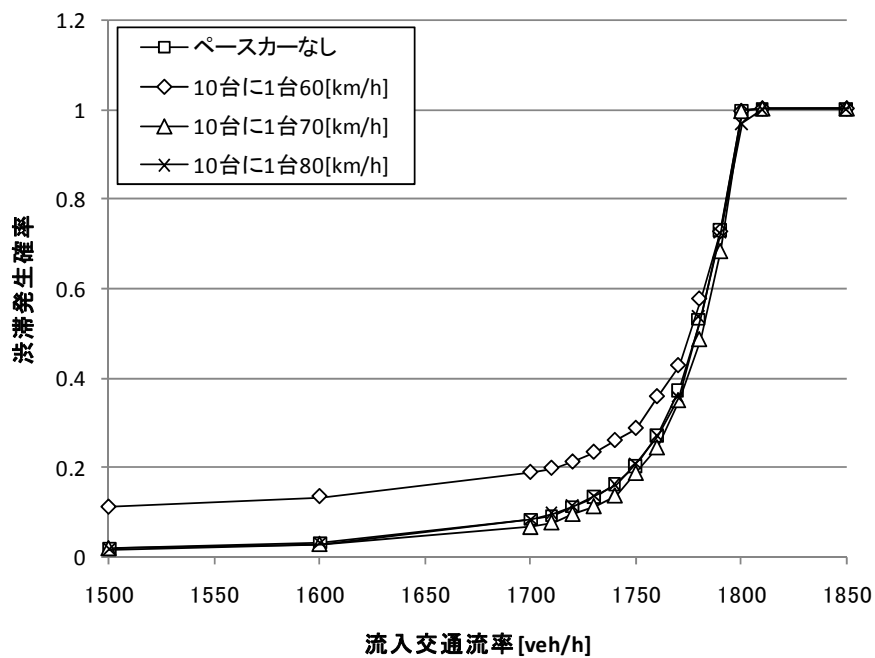


図 6.14 10 台に 1 台の割合でペースカーが混在している場合

6.8 結語

本章では、第5章で得た知見「車群内車両速度は前方車両速度水準に応じて決定される相対速度分布に従って決定される」を踏まえた上で車群内の走行速度遷移過程のモデル化を行った。具体的には、車群内車両速度の遷移確率を記述する走行速度遷移確率行列を定義し、車群内で走行速度が遷移する過程を車群先頭車両速度ベクトルと走行速度遷移確率行列に基づくマルコフ連鎖モデルを用いて表現した。さらに、車群内車両走行速度がある閾値を下回った時点で **Traffic Breakdown** が完遂すると仮定し、車群がボトルネックを流出中に車群内車両の走行速度が閾値を下回る確率を渋滞発生確率と定義した。

その上で、高速道路片側1車線区間を対象に、第4章で構築した車群形成モデルで模擬される車群に対して本モデルを適用し、流入交通流率に対する渋滞発生確率を推定した。その結果、渋滞発生時交通量がばらつく現象を説明することができた。

また、流入交通流率と渋滞発生確率の関係に着目すると、流入交通流率の増大、及びボトルネック直前の片側1車線区間長の延長に伴い、渋滞発生確率が高くなることを示した。さらに、一定の割合で混在する大型車に70[km/h]での走行を課すことにより、車群を分散し、渋滞発生を抑制する効果があることを確認した。

本モデルは車群内の車両に対して全車両が共通の車頭時間で追従するとの仮定の下、構築されている。しかし、実現象では追従時の車頭時間は車種、走行速度、追従状況によって異なると考えられ、考慮する必要がある。今後は車群内での走行速度の遷移過程と共に、車頭時間の遷移過程を把握することが求められる。また、本研究で採用した「車群中車両走行速度が40[km/h]を低下した時点で **Traffic Breakdown** が完遂し、渋滞が発生する」との渋滞定義についてもその妥当性を検討する必要がある。

また、本提案モデルで推定される渋滞発生確率は、走行速度水準の設定や走行速度遷移確率行列の値に大きく影響を受けることが考えられる。本研究では、走行速度水準を10[km/h]単位で区分し設定したが、より適切な走行速度水準の策定方法について検討する余地がある。また、走行速度遷移確率行列の値の差異に対する推定渋滞発生確率の感度分析や、設定した走行速度遷移確率行列の妥当性の検証も行う必要がある。

さらに、本モデルは、流入交通流率が一定の定常的な交通流を対象として、単位時間当たりの渋滞発生確率を推定するものである。しかし、現実には流入交通流率は時間と共に変動する性質を持つ。そこで、今後は流入交通流率の変動を加味した上で、一定時間内に渋滞が発生する確率を推定可能なモデルへと拡張する必要がある。

今後は、本モデルの適用事例を増やすことで妥当性の検証を行うと共に、高速道路多車線区間での渋滞現象を表現できるモデルへと拡張させたい。

第 6 章 参考文献

- 1) National Research Council: Highway Capacity Manual 2000 (CD-ROM), Transportation Research Board Special Report 209, TRB, Washington D.C, 2000.
- 2) 岡村秀樹, 渡辺修治, 泉正之: 高速道路単路部の交通容量に関する調査研究 (下), 高速道路と自動車, Vol.44, No.3, pp.30-40, 2001.
- 3) Lorenz, M. and L. Elefteriadou: A probabilistic approach to defining freeway capacity and breakdown, The Proceedings of the 4th International Symposium on Highway Capacity, pp.84-95, 2000.
- 4) 大口敬, 片倉正彦, 鹿田成則: 高速道路単路部をボトルネックとする渋滞発生特性に関する実証的研究, 高速道路と自動車, 第 44 巻, 第 12 号, pp.27-34, 2001.
- 5) Brilon, W., G. Justin and M. Regler: Reliability of freeway traffic flow: A stochastic concept of capacity, The Proceedings of the 17th International Symposium on Transportation and Traffic Theory, No.7, pp.125-143, 2005.
- 6) Kaplan, E.L. and P. Meier: Nonparametric estimation from incomplete observations, Journal of the American Statistical Association, 53, pp.457-481, 1958.
- 7) Jian Xing, 佐藤久長, 高橋秀喜, 吉川良一: 高速道路のボトルネック交通容量分布及び渋滞発生確率の推定, 第 26 回交通工学研究発表会論文報告集, pp.49-52, 2006.
- 8) Bernard, M. and K.W. Axhausen: A proposal for a new design load concept for highway infrastructures, TRB 85th Annual Meeting, 2006.
- 9) Laval, J.A.: Stochastic processes of moving bottlenecks: Approximate formulas for highway capacity, Transportation Research Record 1988, pp.86-91, 2006.
- 10) 塩見康博, 吉井稔雄, 北村隆一, 吉川良一: 車群形成過程を再現するボトルネック容量推定シミュレーション, 第 26 回交通工学研究発表会論文報告集, pp.45-48, 2006.
- 11) Kuhne, R., R. Mahnke and J. Hinkel: Understanding traffic breakdown: A stochastic approach, The Proceedings of Transportation and Traffic Theory 2007 (Edited by R.E. Allsop, M.G.H. Bell and B.G. Heydecker), pp.777-789, 2007.
- 12) 小宮粹史, 赤羽弘和, 竹平誠治, 草壁郁郎: 都市高速道路におけるサグ渋滞発生要因の微視的分析, 第 35 回土木計画学研究発表会・講演集 CD-ROM, 2007.
- 13) 山岡努, 片倉正彦, 大口敬, 鹿田成則: 車両感知器パルスデータによる渋滞検出方法に関する研究, 土木計画学研究・講演集, Vol.23-1, pp.559-562, 2000.
- 14) 吉川良一: 高速道路暫定 2 車線区間におけるボトルネック交通容量に関する研究, 京都大学博士 (工学) 論文, 2006.

第7章 結論

7.1 本研究のまとめ

交通現象解析の歴史は交通流観測技術進展の歴史である。少量かつ概略的な交通流データから、大量かつ緻密な交通流データを取得、処理することが可能となるにつれ、様々な新しい知見が見出された。それに伴い、観測される交通現象を説明可能な交通流理論・モデルが構築されてきた。本研究で対象とする交通渋滞現象も交通流観測技術の進展・観測データの蓄積によって、その理解が深化されてきた交通現象の一つと言える。

従来、交通渋滞は交通容量上のボトルネックとなる地点に対し、ボトルネック交通容量を上回る交通需要が流入することで発生するとされてきた¹⁾。ただし、ここで想定されているボトルネックとは信号交差点や合流部、もしくは車線数が減少する地点など、その周辺区間と比べて明らかに交通容量の低い地点を意味する。

1980年代になると、高速道路単路区間であってもサグやトンネル入り口部などドライバーに微少な減速を強いる道路構造がボトルネックとなって渋滞が発生すること²⁾が明らかとなった。さらに、2000年代になると、ほぼ同一の交通条件であっても渋滞の発生する交通量水準は確率的に変動すること³⁾⁴⁾が確認された。この時点で、従来認識されてきた「ボトルネック交通容量を上回る交通需要が流入することで渋滞が発生する」との渋滞発生メカニズムは再考を迫られることとなった。以降では渋滞現象を確率事象と捉え、交通容量自体が確率的に変動するという *Stochastic Capacity* の概念の下、交通容量の確率分布を推定するアプローチ⁵⁾や、それに対して、渋滞を発生させる特定の状況が確率的に生起するとの考えから、流入交通量に対する渋滞発生確率を推定するアプローチ⁶⁾などから渋滞現象の把握がなされている。

本論文では、後者のアプローチに基づいて高速道路単路区間ボトルネックで発生する渋滞現象を説明する「車群交通流モデル」を構築した。車群交通流モデルでは、局所的に高密度化した交通流状態である車群に着目し、車群がボトルネックに流入する際に車群内で発生する微少な減速波が増幅伝播し渋滞に至ると考える。その上で、車群形成過程、及び車群内での減速波の発生・伝播過程を模擬することで、渋滞現象の確率的特性を捉えることを目的とした。

以下に、各章で得た成果をまとめる。

第2章 交通流解析と交通流理論の系譜

第2章では、1950年代より展開されてきた交通流解析の知見と、それに伴って構築されてきた交通流理論の系譜を整理、俯瞰し、既往研究に対する本研究の位置づけを行った。まず、既往の交通流理論を、交通流を圧縮性流体に近似し交通流状態の時空間的な変遷を記述するマクロ交通流モデル、及び車両1台1台の挙動をモデル化するミクロ交通流モデ

ル、交通流の統計的性質を記述する交通流静的モデルに大別して整理し、その限界を指摘した。次に、これまでに蓄積されてきた高速道路単路部でのボトルネック現象に関する知見を整理し、本研究で車群に着目する意義を明示し、構築する車群交通流モデルの目指すべき方向性を示した。

第3章 連続する車両の走行速度相関に基づく車群判定手法

第3章では、自由走行車両とそれに続く追従走行車両の連なりを車群と定義し、実データに基づいて自由走行車両と追従走行車両を判別する手法について検討を行った。具体的には、連続する2台の車両が追従状態にある場合、先行車両と後続車両との走行速度に相関が生じると考え、連続する2車両間の走行速度相関と車頭時間の関係を高速道路片側2車線区間、及び片側1車線区間での実観測データより算出した。

その結果、車頭時間が大きくなるに連れ、連続する2車両の走行速度相関係数は小さくなる傾向にあることが確認された。また、追従走行状態、減速走行状態、自由走行状態にある車両の構成比率が車頭時間水準によって異なることが、車頭時間水準毎の走行速度相関係数値に大きく影響を与えていることが示唆された。

以上の知見を踏まえ、本研究では片側2車線区間走行車線では車頭時間5.5秒を、追越車線では4.0秒を、片側1車線区間では車頭時間4.0秒を追従走行と自由走行の閾値とするのが妥当であることを示し、車群判定基準とした。

第4章 車群形成モデルによる希望走行速度分布と車群台数分布の推定

第4章では、交通流の根源的な性質を表す指標として希望走行速度分布に着目した。希望走行速度分布は交通流の多様性を表すため交通流解析を行う上で必要不可欠である。しかしながら、実際の交通流は、自由走行車両と追従走行車両が混在しているため、直接観測によっては、希望走行速度分布を導出することはできない。そこで、本章では車両間の希望走行速度の差異によって車群が形成され则认为、観測された車群形成状況に基づいて希望走行速度分布を推定する手法を構築した。

具体的には、まず、高速道路片側1車線区間での車群形成過程を希望走行速度分布の関係で記述する車群形成モデルを構築した。続いて、構築した車群形成モデルを用いて、車群の先頭車両速度ならびに車群台数の観測値から希望走行速度分布を推定する手法、及び推定された希望走行速度分布から車群台数分布を推定する手法を構築した。

最後に、本推定手法を実観測データに適用した結果、妥当性の高い希望走行速度分布が推定され、さらに推定された希望走行速度分布を入力として用いることで交通量レベルによらず正確な車群台数分布が推定可能であることが示された。

第 5 章 ボトルネック通過時の車両走行特性の把握

第 5 章では、ボトルネック区間に設置された車両感知器により約 40 日間観測された交通流パルスデータに基づいて車群を抽出、車群に属する車両がボトルネックを通過する際の走行速度の遷移過程に着目し、その特性を調べた。その結果、車群中を走行する車両に関して、

- (1) 車群中車両の相対速度分布は、直前方車両走行速度水準によってその平均、分散が異なる。
- (2) 相対速度分布の統計的性質は、ボトルネック上流側／下流側で異なる。特にボトルネック上流側では、走行速度水準が低くなると相対速度分布の平均値が負に転じ、車群内車両速度は漸次減速する傾向を持つ。
- (3) 同一の車群内では連続する車両の相対速度は無相関に決定される。

という 3 つの知見が示唆された。

第 6 章 渋滞発生確率推定モデルの構築と適用

第 5 章の知見を踏まえ、第 6 章では車群内車両速度の遷移確率を記述する走行速度遷移確率行列を定義し、車群内で走行速度が遷移する過程を車群先頭車両速度ベクトルと走行速度遷移確率行列に基づくマルコフ連鎖モデルを用いて表現した。さらに、Traffic Breakdown が完遂した状況を、車群内車両走行速度が 40[km/h]を下回った状態と簡易的に定義し、車群がボトルネックを流出中に車群内車両の走行速度が 40[km/h]以下となる確率を車群渋滞発生確率と定義した。その上で、第 4 章で構築した車群形成モデルで推定される車群に対して本モデルを適用し、流入交通流率に対する渋滞発生確率を推定した。

その結果、渋滞発生時の交通量が確率的に変動することを説明した。また、流入交通流率の増大、及びボトルネック直前の片側 1 車線区間長の延長に伴い、渋滞発生確率が高くなることが示された。さらに、一定割合で混在する大型車に対して、適切な走行速度での走行を課することで車群を分散させ、渋滞発生を抑制する効果があることを示した。

7.2 今後の研究課題

以下に、今後の研究課題を整理し、本論文の結語とする。

- (1) 車群定義について、本研究では車頭時間 4.0 秒を追従走行と自由走行の閾値であるとし、車頭時間 4.0 秒未満の車両を追従走行、以上の車両を自由走行と一律に定義した。しかし、第 3 章でも指摘したように、前方車両に対する車両の走行状態を詳細に分類すると、追従走行状態、自由走行状態、前方車両を視認し自由走行状態から追従状態へと遷移しつつある減速状態の 3 段階に分類できると考えられる。そこで、車両追従挙動についてより精緻な解析を行うためには、各車頭時間水準で混在する 3 つの段階

の走行状態にある車両の構成比率を推定する手法の構築が望まれる。

- (2) 第 4 章で構築した車群形成モデルは追越しの禁止された片側 1 車線区間のみを対象としている。しかし、より広く車群交通流モデルを適用するためには、片側 2 車線以上の区間に対応できるようモデルの拡張を行わなければならない。片側 2 車線以上の区間での車群形成状況を模擬するためには、前方車両に対する追従挙動以外に、前方の低速車両を追越すための車線変更挙動を考慮しなくてはならない。片側 2 車線以上の区間に拡張した車群形成モデルでは、このような車線変更挙動を内包することで、交通量水準に対する車線利用率の偏りなどを的確に再現し、車線毎の車群形成状況を表現できることが望まれる。
- (3) 車群内の車両走行速度の遷移過程について、第 5 章ではボトルネック上流側、及び下流側の複数の地点で得られた交通流パルスデータを地点毎に分析し、相対速度分布の性質が上流側と下流側で異なることを示した。しかし、交通渋滞はボトルネックで発生した減速波が上流へ伝播することによって発生することを勘案すると、走行速度の遷移過程は観測地点間で相関を持つことが考えられる。そこで、今後は観測地点間に存在する相関に着目した上で、車群内車両走行状態の空間的な遷移状況を分析し、詳細な渋滞発生メカニズムを把握する必要がある。
- (4) 第 6 章で構築した渋滞発生確率推定モデルは、流入交通流率が一定の定常的な交通流を対象として、単位時間当たりの渋滞発生確率を推定するものである。しかし、現実には流入交通流率は時間と共に変動する性質を持つ。そこで、今後は流入交通流率の変動を加味した上で、一定時間内に渋滞が発生する確率を推定可能なモデルへと拡張する必要がある。
- (5) 今回提案した車群交通流モデルでは自由流状態から渋滞が発生するまでの交通流特性を把握することを目的とした。しかし、より効率的かつ効果的な交通運用・道路管理を実施するためには、渋滞発生後、早急に渋滞を解消させ、交通流率を高水準に維持する施策が必要となる。そこで、今後は渋滞流での車両挙動を表現できるモデルへと拡張し、渋滞の早期解消を促す施策について検討を行う。

第 7 章 参考文献

- 1) National Research Council: Highway Capacity Manual 2000 (CD-ROM), Transportation Research Board Special Report 209, TRB, Washington D.C, 2000.
- 2) 越正毅: 高速道路のボトルネック容量, 土木学会論文集, 第 371 号/IV-5, pp.1-7, 1986.
- 3) Lorenz, M. and L. Elefteriadou: A probabilistic approach to defining freeway capacity and breakdown, The Proceedings of the 4th International Symposium on Highway Capacity, pp.84-95, 2000.
- 4) 岡村秀樹, 渡辺修治, 泉正之: 高速道路単路部の交通容量に関する調査研究 (下), 高速道路と自動車, Vol.44, No.3, pp.30-40, 2001.
- 5) Brilon, W., G. Justin and M. Regler; Reliability of freeway traffic flow: A stochastic concept of capacity, The Proceedings of the 17th International Symposium on Transportation and Traffic Theory, No.7, pp.125-143, 2005.
- 6) Kuhne, R., R. Mahnke and J. Hinkel: Understanding traffic breakdown: A stochastic approach, The proceedings of Transportation and Traffic Theory 2007 (Edited by R.E. Allsop, M.G.H. Bell and B.G. Heydecker), pp.777-789, 2007.

謝辞

本論文を結ぶにあたり、本研究を遂行する上でご指導とご援助を頂いた全ての方々に感謝の意を表します。

京都大学大学院工学研究科北村隆一教授には、終始懇切丁寧なご指導とご教鞭を頂きました。先生から頂いた、シンプルでありながらも本質を鋭く突いた数多くのご指摘、ご助言は本研究を遂行する上で大きな糧となりました。心より感謝致します。今後も北村先生にご教授頂いた“Critical Thinking”の姿勢を肝に銘じ、一時の趨勢に堕することなく本質を見極める能力を身に付けて参りたいと思います。

京都大学大学院工学研究科谷口栄一教授、小林潔司教授には拙論の副査を務めて頂き、多くの有用なご指摘を頂きました。厚く御礼申し上げます。

京都大学大学院工学研究科吉井稔雄准教授には、本研究の構想から、遂行、論文執筆など細部に渡って指導して頂きました。吉井先生からは研究に対する姿勢のみならず、人生の指針となる多くの訓辞を頂きました。その中でも特に、「逆の立場から物事を考えること」、「極限を考えること」は、私があらゆる岐路に立たされた時の基本的な考え方となりました。深く御礼申し上げます。同菊池輝助教には、研究に関して多くのご指摘を頂いたと共に、人生の先達として進路の相談などに気軽に応じて頂き、様々なご助言を賜りました。菊池先生のアドバイスが無ければ、私が博士課程への進学を決意することも無かったと思います。心より御礼申し上げます。

京都大学大学院工学研究科宇野伸宏准教授、岐阜大学工学部社会基盤工学科倉内文孝准教授には、研究室ゼミや学会発表の場などで本研究に対して数多くの重要なご指摘、ご意見を頂きました。厚く御礼申し上げます。

片倉正彦東京都立大学名誉教授、東京大学生産技術研究所桑原雅夫教授、首都大学東京都市環境科学研究科大口敬教授、同小根山浩之准教授、東京大学生産技術研究所田中伸治講師、首都高速道路株式会社割田博氏、神戸大学大学院工学研究科井料隆雅助教、国土交通省浅野美帆氏、高知工科大学社会マネジメント研究所片岡源宗助手には全 19 回に及ぶ勉強会の中で、長時間に渡り議論をして頂き、研究の方向性、データの分析方法など細部に渡りご教示頂きました。また、桑原先生には本研究で用いた東北自動車道の交通流データを頂きました。本論文の完成はこの勉強会無くしてはあり得ません。ここに記して甚大なる感謝の意を表します。

財団法人高速道路技術センターの Xing Jian 氏には、東海北陸自動車道での交通流データを提供して頂くと共に、研究推進にあたり全面的な協力を頂戴しました。深く御礼申し上げます。

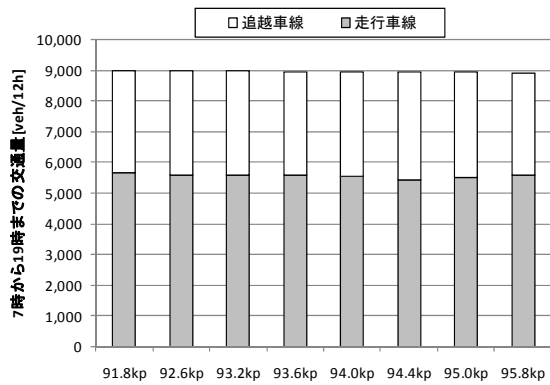
東京大学大学院社会基盤学専攻西内裕晶氏には、研究に関する議論のみならず、博士後期課程の同級生として数多くの悩みを酒の肴へと昇華して頂きました。心より御礼申し上げます。

京都大学工学研究科都市社会工学専攻交通行動システム研究室の諸先輩方、同輩、後輩諸氏には多くのご意見やご協力を頂きました。特に、中井周作氏には私のような頼りない先輩を支え、励まして頂きました。心より感謝致します。

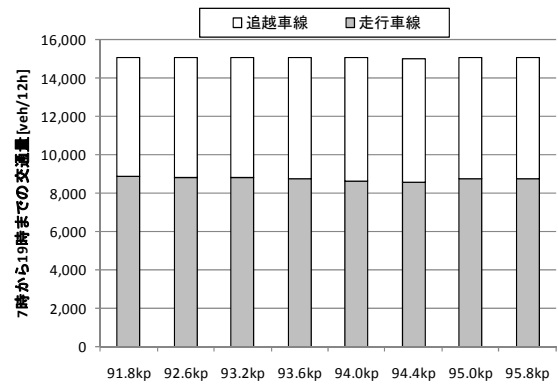
また、長きに渡る学生生活を終始支援してくれた家族、博士課程進学を支持し応援してくれた小島原明子さん、私を支えて頂いた友人達に、この場を借りまして深く御礼申し上げます。ありがとうございました。

最後に、ここに記しきれない多くの方々の学恩、ご支援によって本研究がなされたことを銘記し、深く感謝いたします。

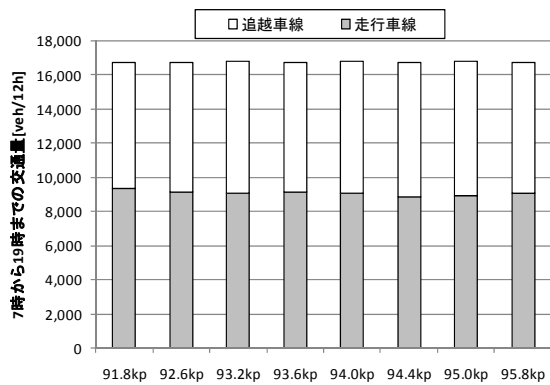
附録 1 東北自動車道下り線 12 時間交通量比較



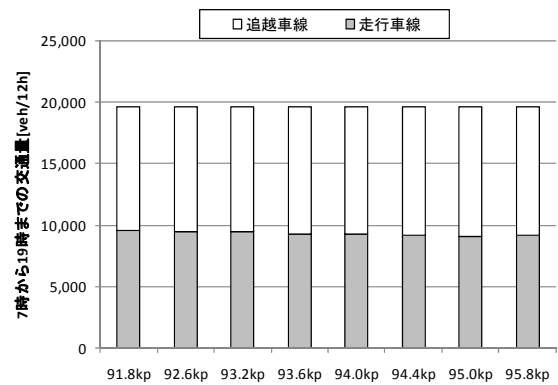
附録 1.1 1994 年 12 月 26 日 12 時間交通量



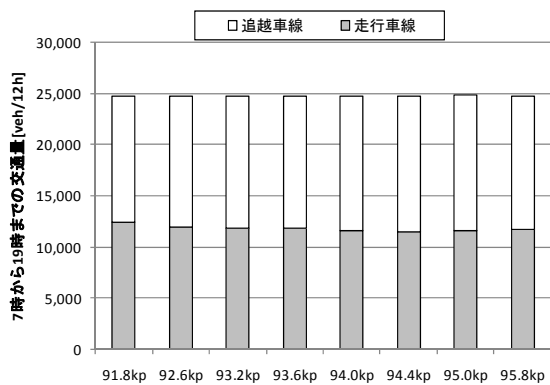
附録 1.2 1994 年 12 月 27 日 12 時間交通量



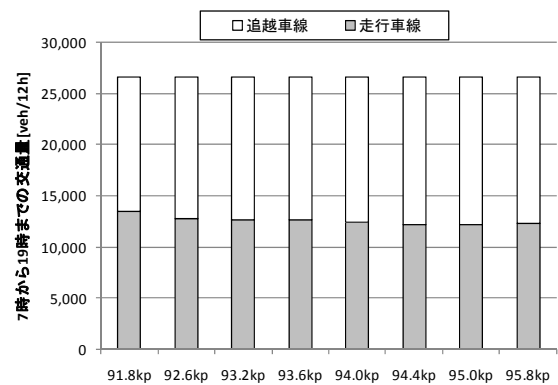
附録 1.3 1994 年 12 月 28 日 12 時間交通量



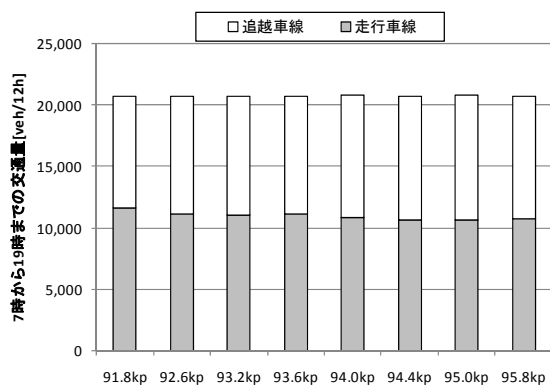
附録 1.4 1994 年 12 月 29 日 12 時間交通量



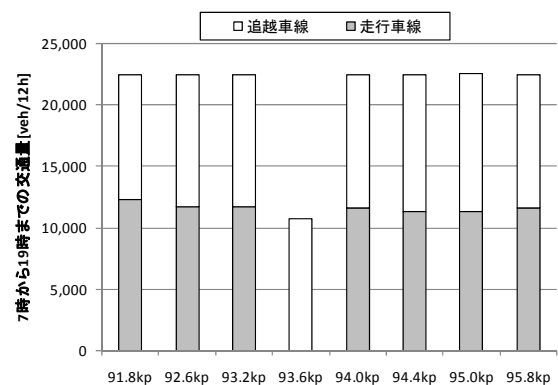
附録 1.5 1994 年 12 月 30 日 12 時間交通量



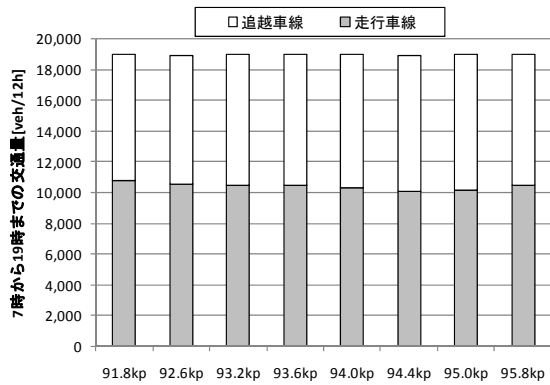
附録 1.6 1994 年 12 月 31 日 12 時間交通量



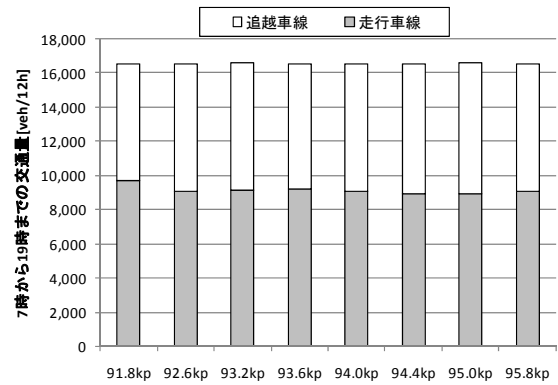
附録 1.7 1995 年 1 月 1 日 12 時間交通量



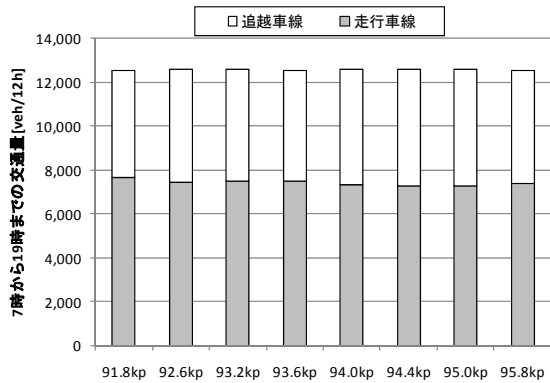
附録 1.8 1995 年 1 月 2 日 12 時間交通量



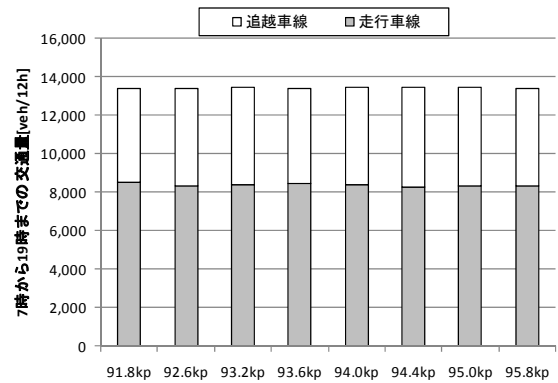
附録 1.9 1995 年 1 月 3 日 12 時間交通量



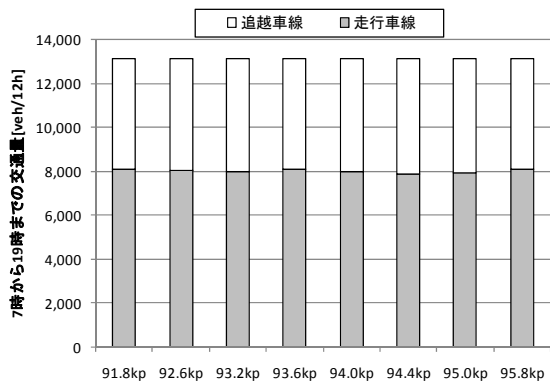
附録 1.10 1995 年 1 月 4 日 12 時間交通量



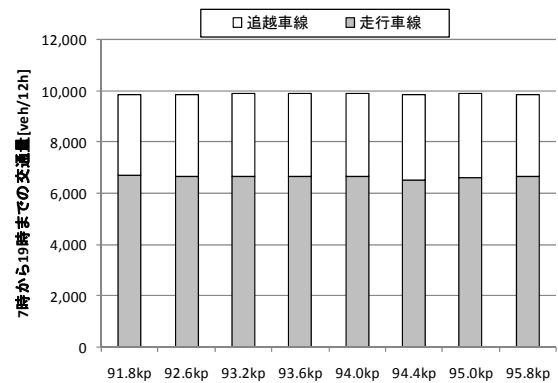
附録 1.11 1995 年 1 月 5 日 12 時間交通量



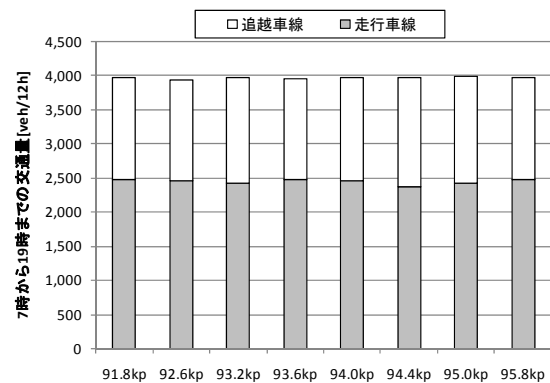
附録 1.12 1995 年 1 月 6 日 12 時間交通量



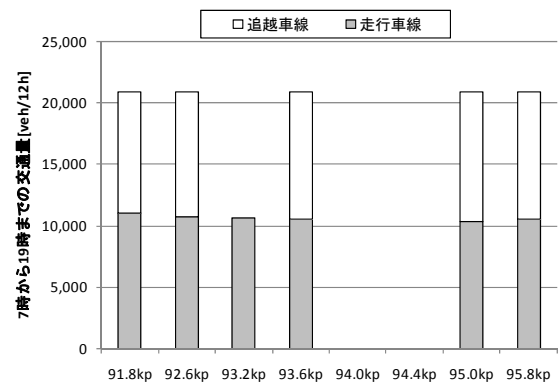
附録 1.13 1995 年 1 月 7 日 12 時間交通量



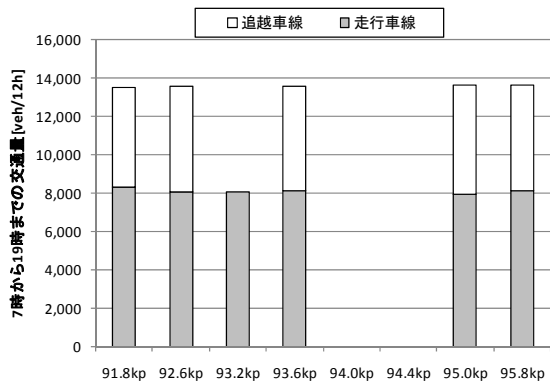
附録 1.14 1995 年 1 月 8 日 12 時間交通量



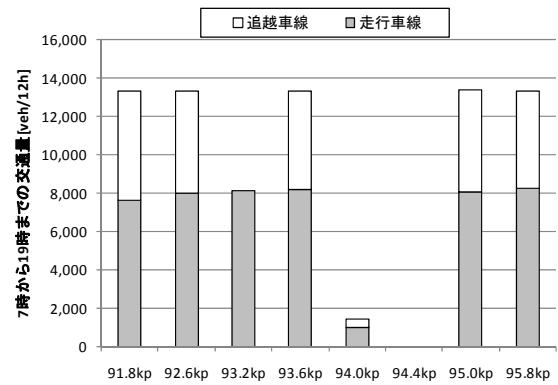
附録 1.15 1995 年 1 月 9 日 12 時間交通量



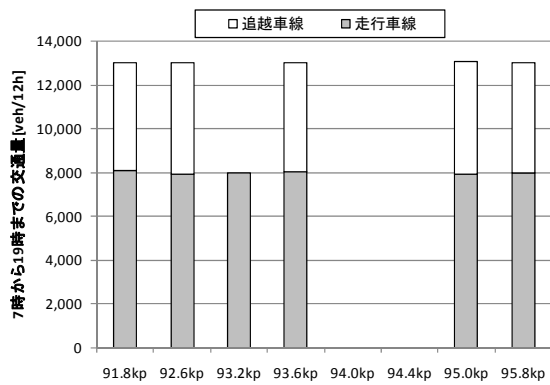
附録 1.16 1995 年 4 月 22 日 12 時間交通量



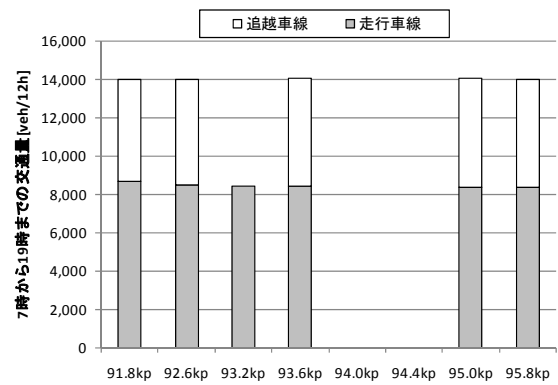
附録 1.17 1995 年 4 月 23 日 12 時間交通量



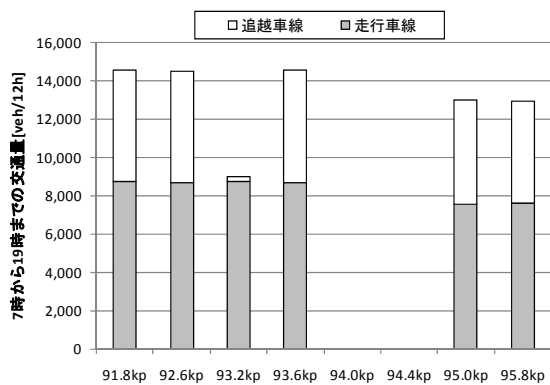
附録 1.18 1995 年 4 月 24 日 12 時間交通量



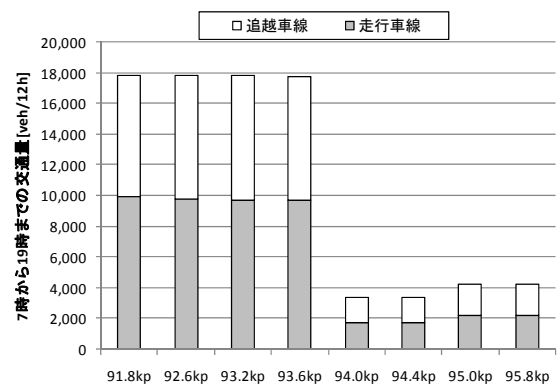
附録 1.19 1995 年 4 月 25 日 12 時間交通量



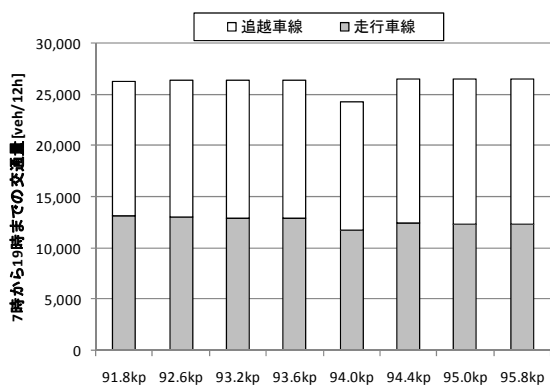
附録 1.20 1995 年 4 月 26 日 12 時間交通量



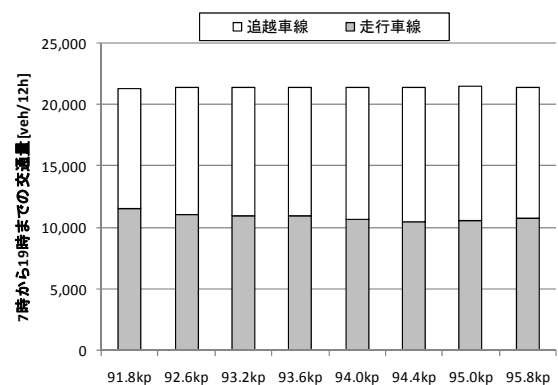
附録 1.21 1995 年 4 月 27 日 12 時間交通量



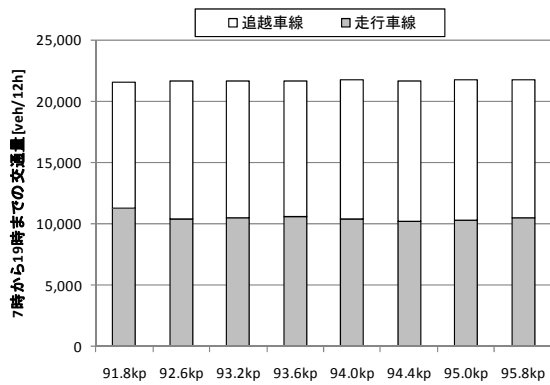
附録 1.22 1995 年 4 月 28 日 12 時間交通量



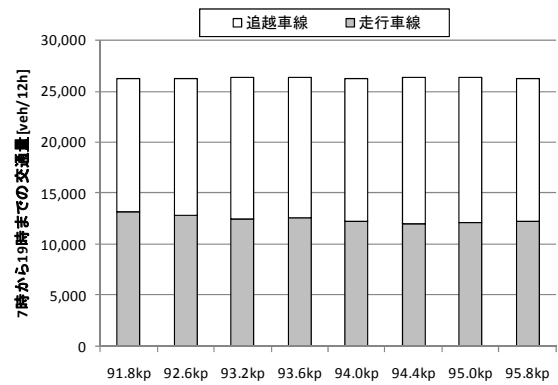
附録 1.23 1995 年 4 月 29 日 12 時間交通量



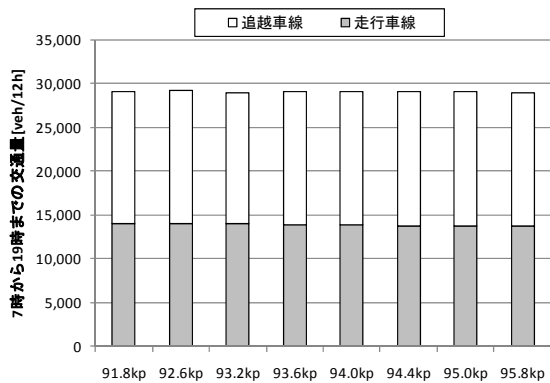
附録 1.24 1995 年 4 月 30 日 12 時間交通量



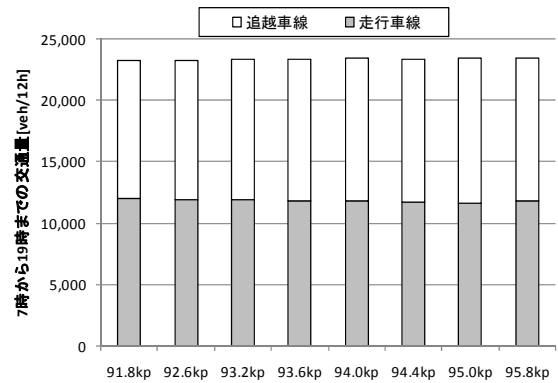
附録 1.25 1995 年 5 月 1 日 12 時間交通量



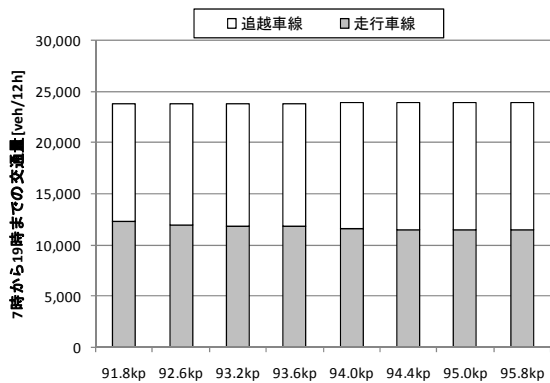
附録 1.26 1995 年 5 月 2 日 12 時間交通量



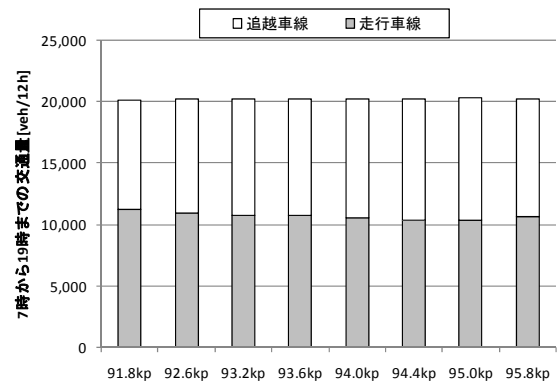
附録 1.27 1995 年 5 月 3 日 12 時間交通量



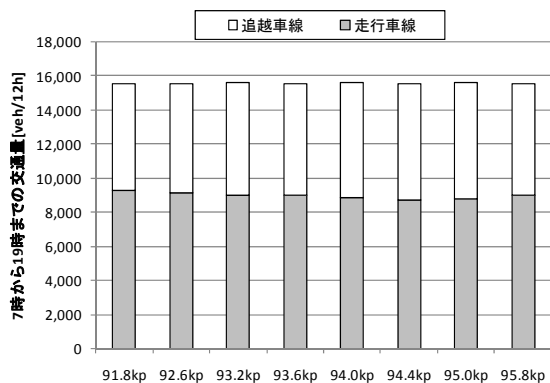
附録 1.28 1995 年 5 月 4 日 12 時間交通量



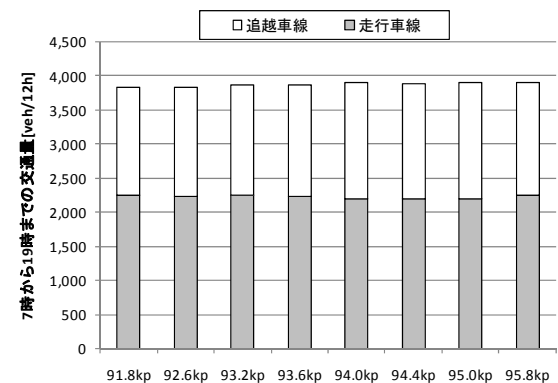
附録 1.29 1995 年 5 月 5 日 12 時間交通量



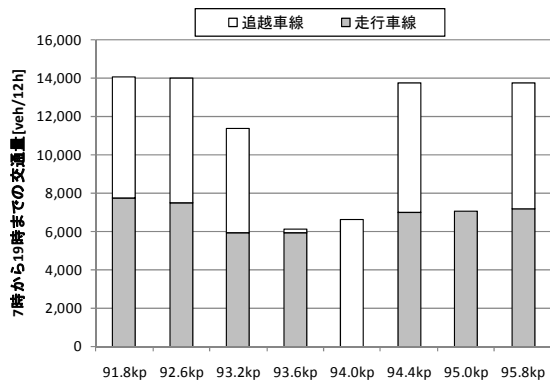
附録 1.30 1995 年 5 月 6 日 12 時間交通量



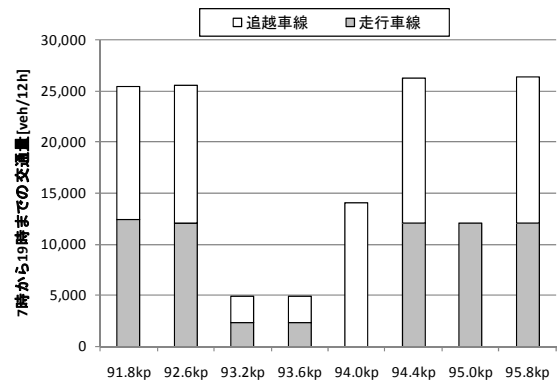
附録 1.31 1995 年 5 月 7 日 12 時間交通量



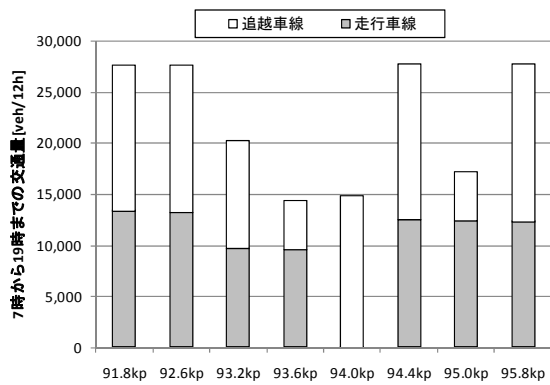
附録 1.32 1995 年 5 月 8 日 12 時間交通量



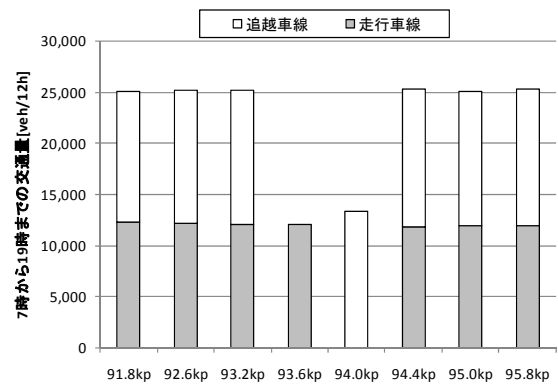
附録 1.33 1995 年 8 月 9 日 12 時間交通量



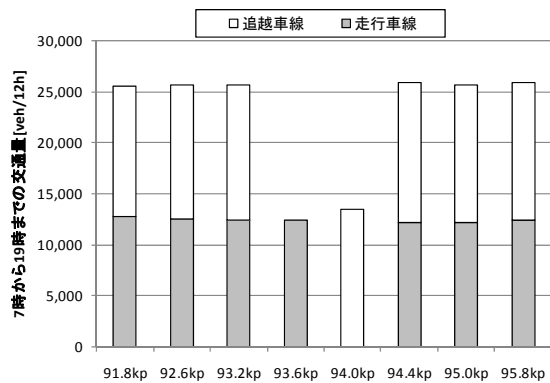
附録 1.34 1995 年 8 月 10 日 12 時間交通量



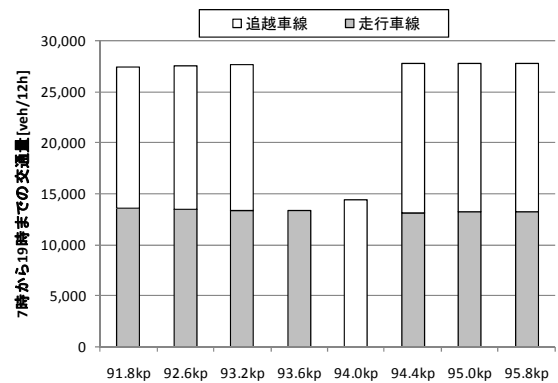
附録 1.35 1995 年 8 月 11 日 12 時間交通量



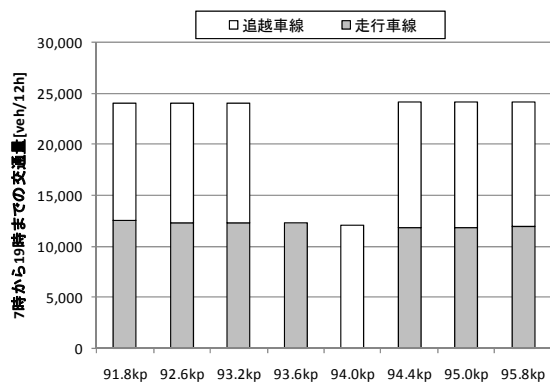
附録 1.36 1995 年 8 月 12 日 12 時間交通量



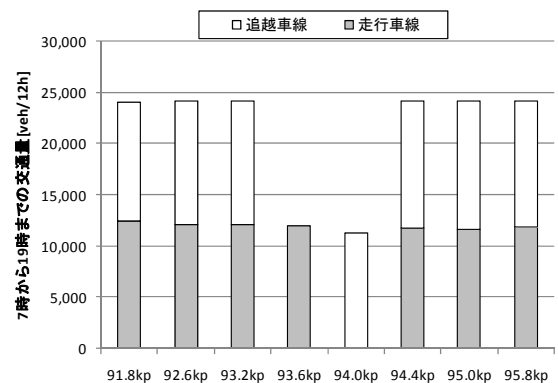
附録 1.37 1995 年 8 月 13 日 12 時間交通量



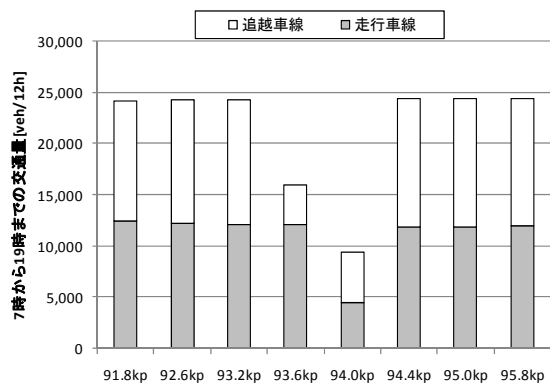
附録 1.38 1995 年 8 月 14 日 12 時間交通量



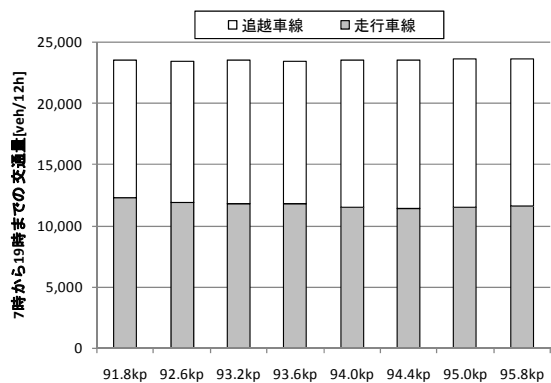
附録 1.39 1995 年 8 月 15 日 12 時間交通量



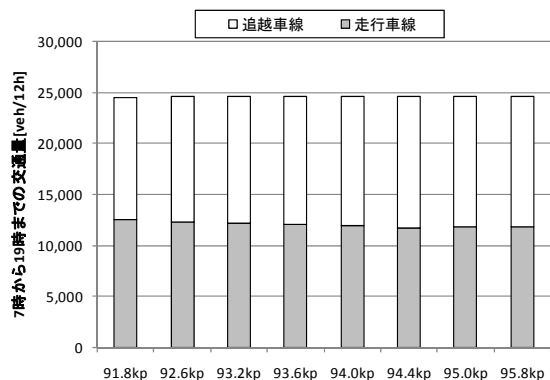
附録 1.40 1995 年 8 月 16 日 12 時間交通量



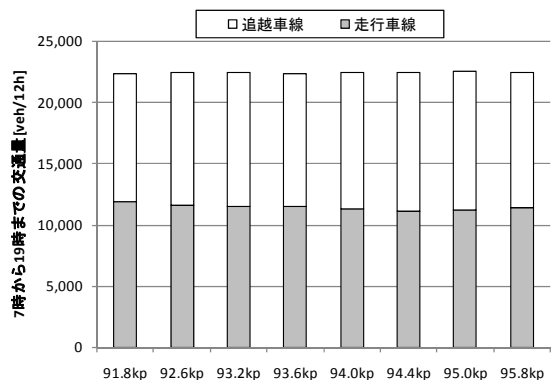
附録 1.41 1995 年 8 月 17 日 12 時間交通量



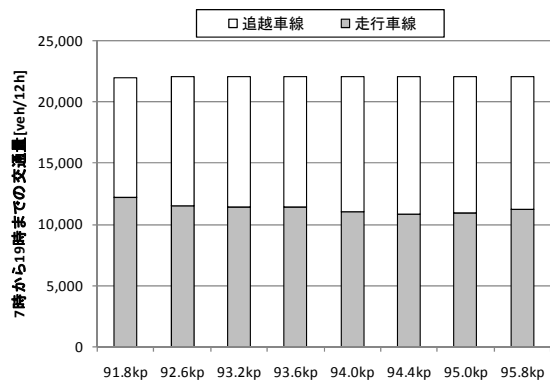
附録 1.42 1995 年 8 月 18 日 12 時間交通量



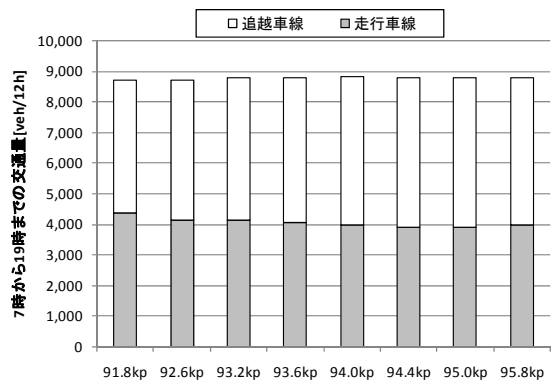
附録 1.43 1995 年 8 月 19 日 12 時間交通量



附録 1.44 1995 年 8 月 20 日 12 時間交通量

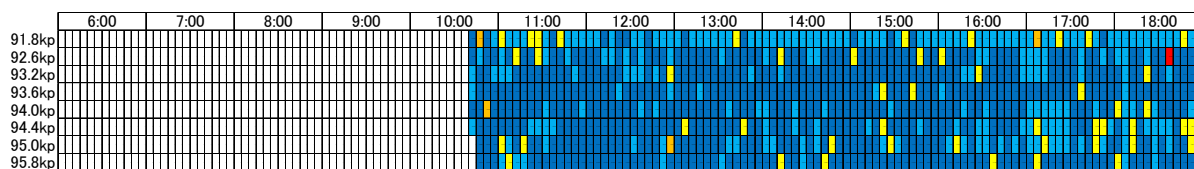


附録 1.45 1995 年 8 月 21 日 12 時間交通量

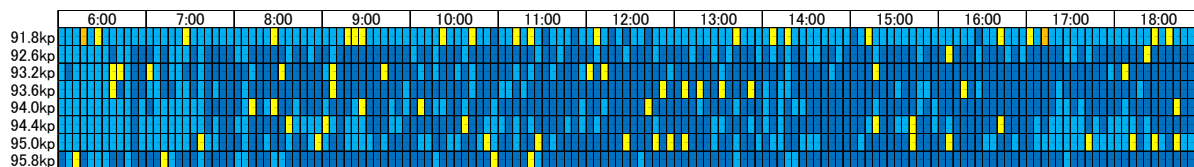


附録 1.46 1995 年 8 月 22 日 12 時間交通量

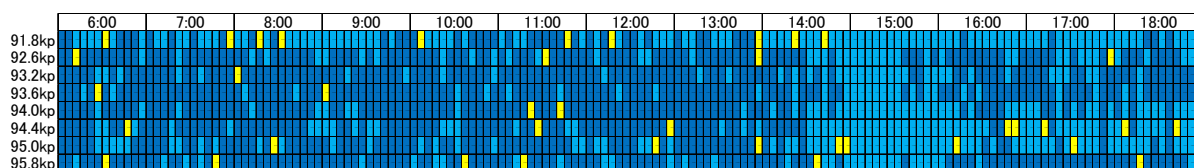
附録 2 東北自動車道下り線 5 分間平均走行速度コンター図



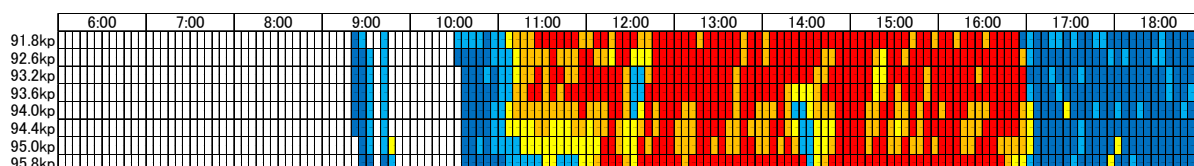
附録 2.1 1994 年 12 月 26 日 5 分間平均走行速度コンター図



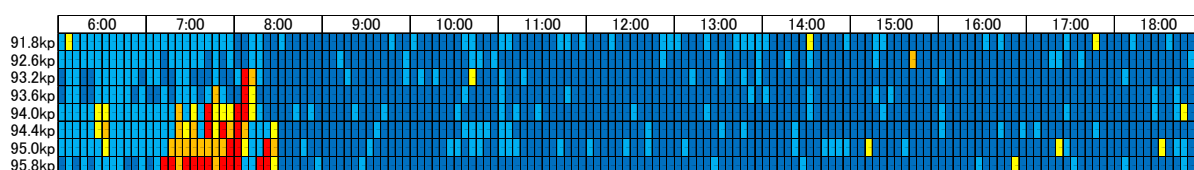
附録 2.2 1994 年 12 月 27 日 5 分間平均走行速度コンター図



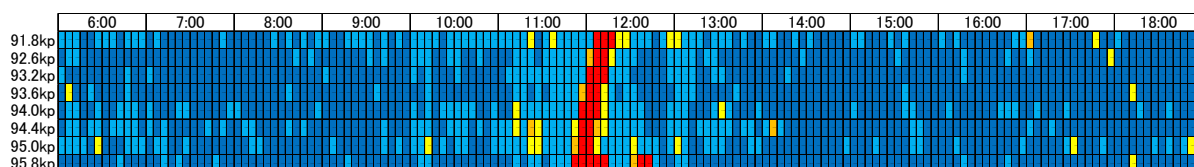
附録 2.3 1994 年 12 月 28 日 5 分間平均走行速度コンター図



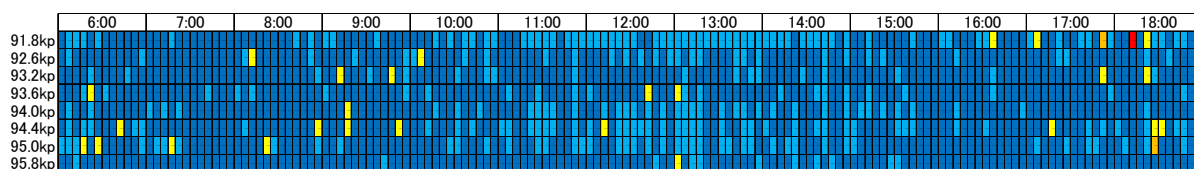
附録 2.4 1994 年 12 月 29 日 5 分間平均走行速度コンター図



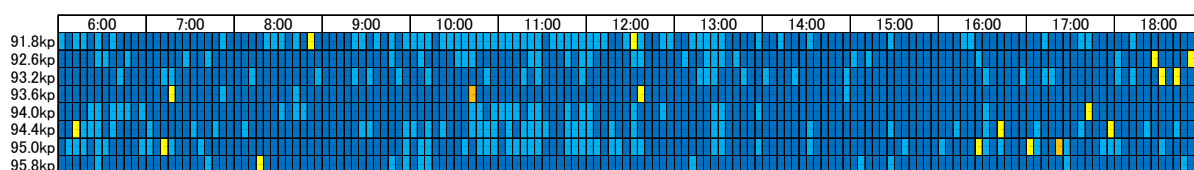
附録 2.5 1994 年 12 月 30 日 5 分間平均走行速度コンター図



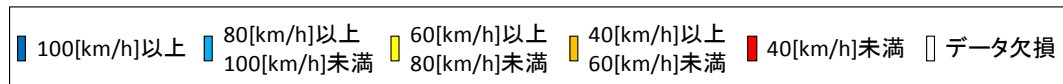
附録 2.6 1994 年 12 月 31 日 5 分間平均走行速度コンター図

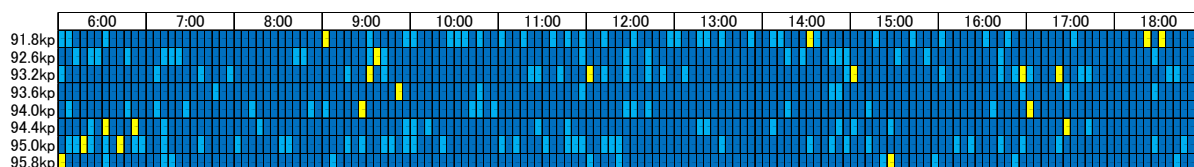


附録 2.7 1995 年 1 月 1 日 5 分間平均走行速度コンター図

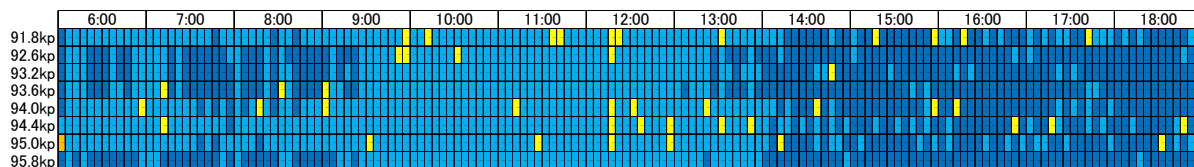


附録 2.8 1995 年 1 月 2 日 5 分間平均走行速度コンター図

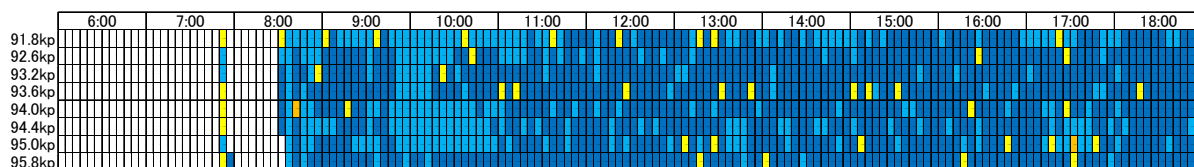




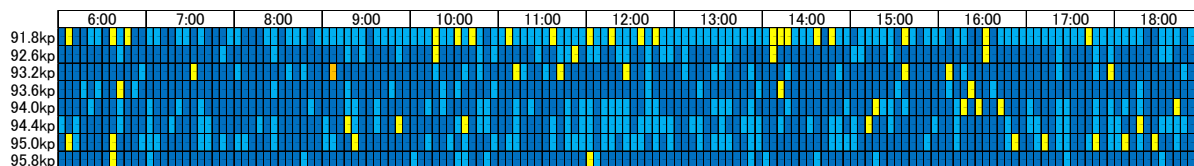
附録 2.9 1995 年 1 月 3 日 5 分間平均走行速度コンター図



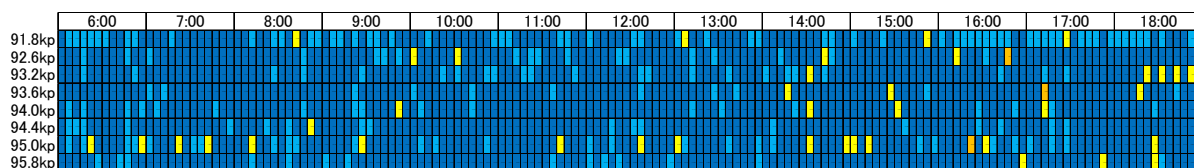
附録 2.10 1995 年 1 月 4 日 5 分間平均走行速度コンター図



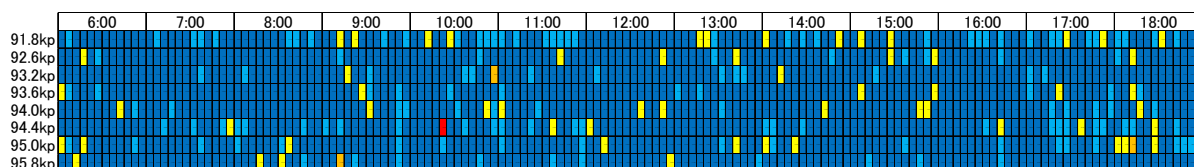
附録 2.11 1995 年 1 月 5 日 5 分間平均走行速度コンター図



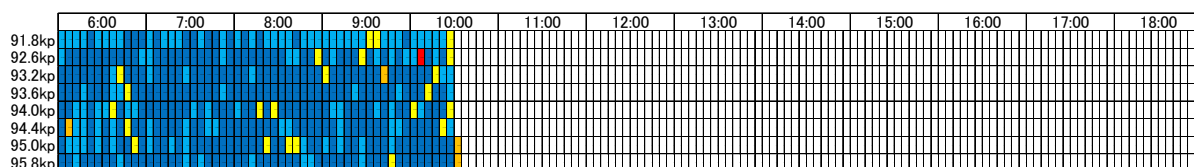
附録 2.12 1995 年 1 月 6 日 5 分間平均走行速度コンター図



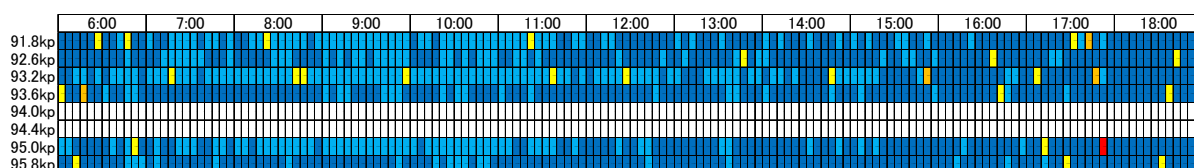
附録 2.13 1995 年 1 月 7 日 5 分間平均走行速度コンター図



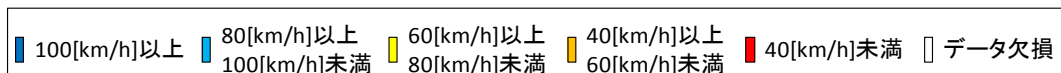
附録 2.14 1995 年 1 月 8 日 5 分間平均走行速度コンター図

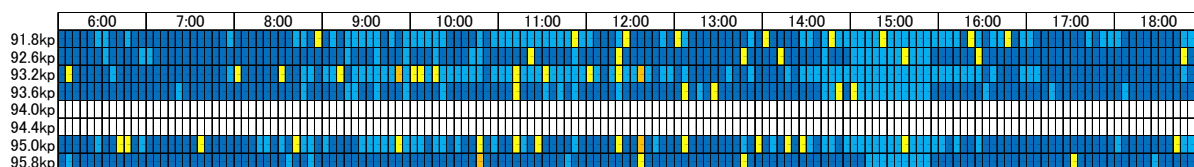


附録 2.15 1995 年 1 月 9 日 5 分間平均走行速度コンター図

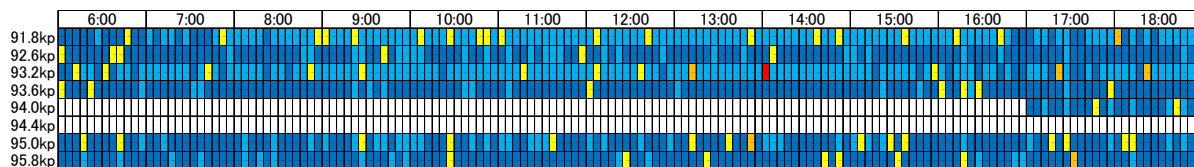


附録 2.16 1995 年 4 月 22 日 5 分間平均走行速度コンター図

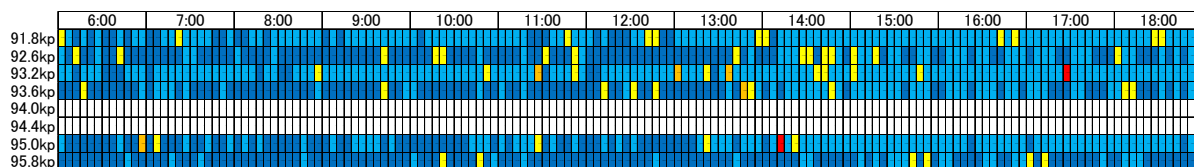




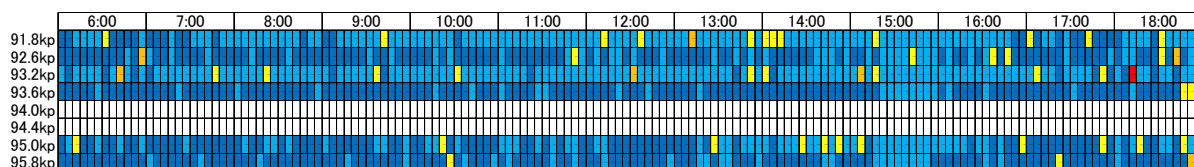
附録 2.17 1995 年 4 月 23 日 5 分間平均走行速度コンター図



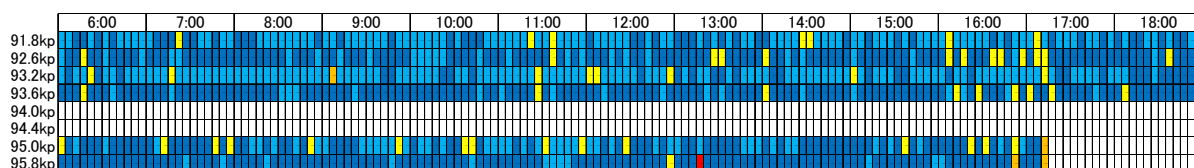
附録 2.18 1995 年 4 月 24 日 5 分間平均走行速度コンター図



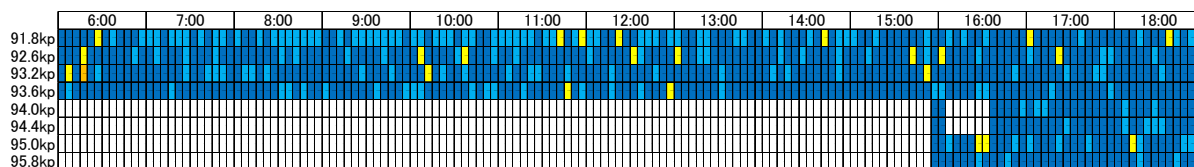
附録 2.19 1995 年 4 月 25 日 5 分間平均走行速度コンター図



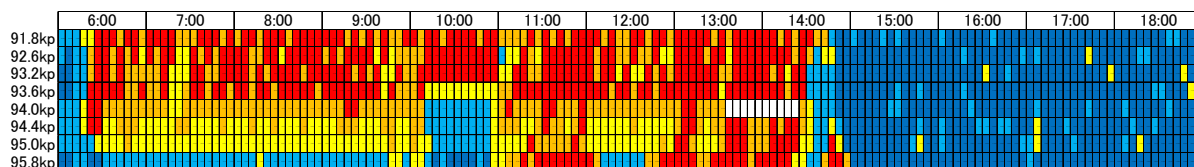
附録 2.20 1995 年 4 月 26 日 5 分間平均走行速度コンター図



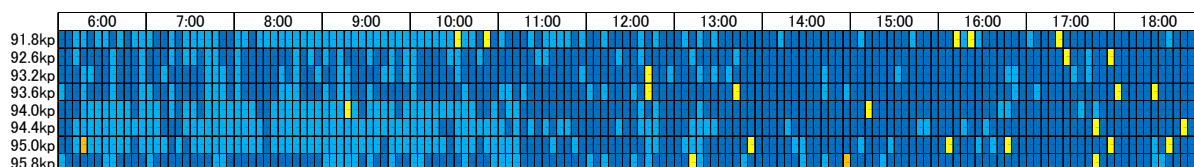
附録 2.21 1995 年 4 月 27 日 5 分間平均走行速度コンター図



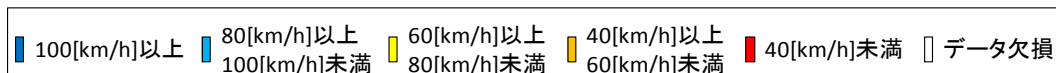
附録 2.22 1995 年 4 月 28 日 5 分間平均走行速度コンター図

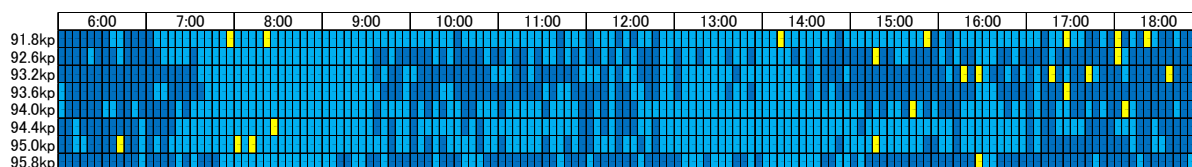


附録 2.23 1995 年 4 月 29 日 5 分間平均走行速度コンター図

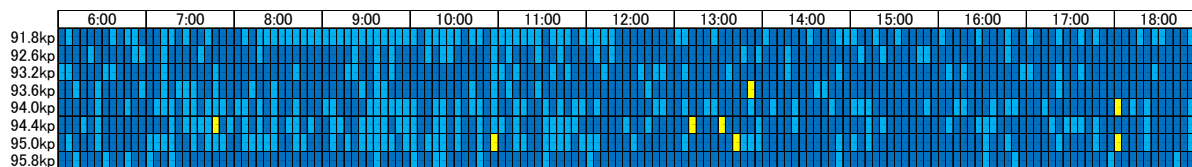


附録 2.24 1995 年 4 月 30 日 5 分間平均走行速度コンター図

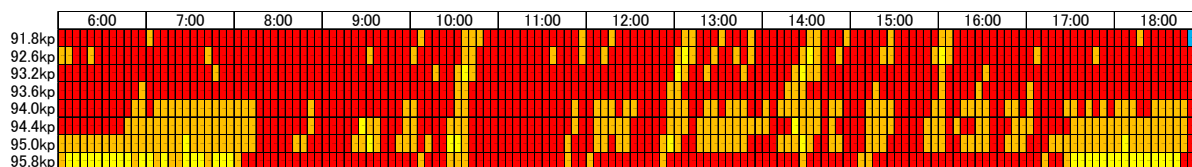




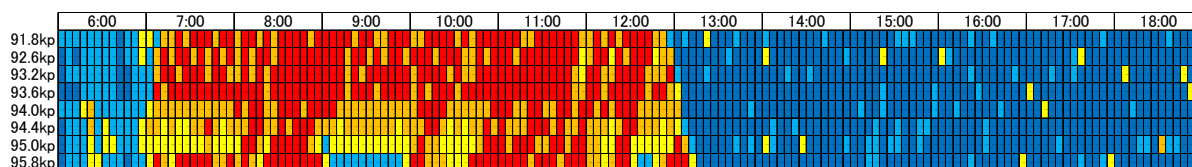
附録 2.25 1995 年 5 月 1 日 5 分間平均走行速度コンター図



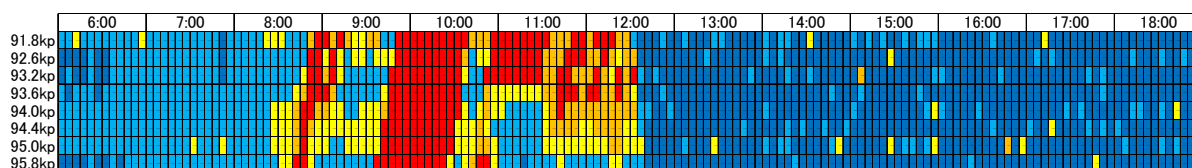
附録 2.26 1995 年 5 月 2 日 5 分間平均走行速度コンター図



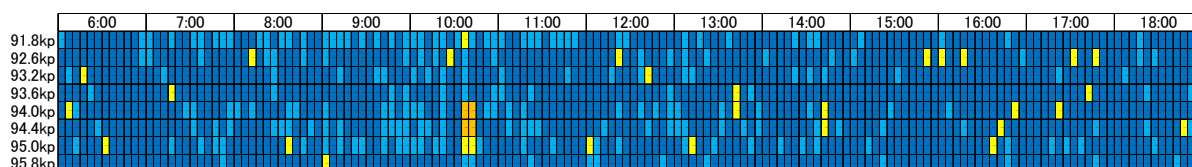
附録 2.27 1995 年 5 月 3 日 5 分間平均走行速度コンター図



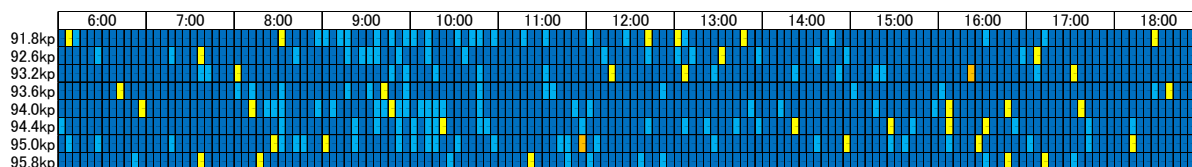
附録 2.28 1995 年 5 月 4 日 5 分間平均走行速度コンター図



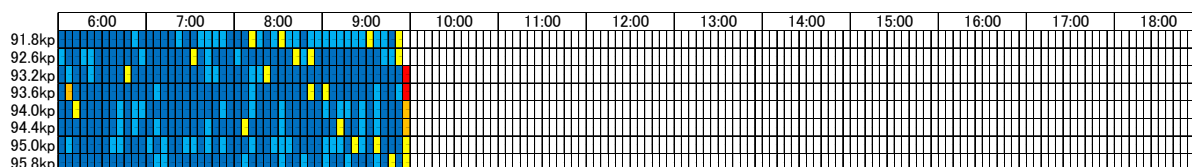
附録 2.29 1995 年 5 月 5 日 5 分間平均走行速度コンター図



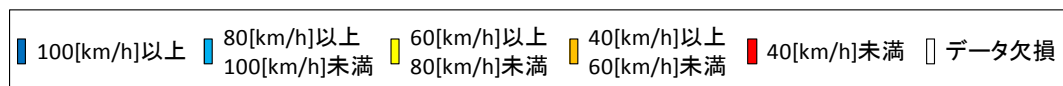
附録 2.30 1995 年 5 月 6 日 5 分間平均走行速度コンター図

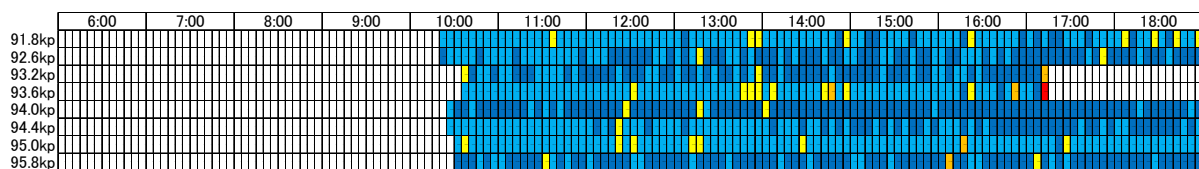


附録 2.31 1995 年 5 月 7 日 5 分間平均走行速度コンター図

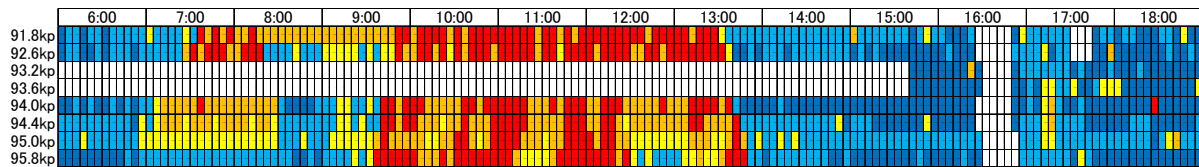


附録 2.32 1995 年 5 月 8 日 5 分間平均走行速度コンター図

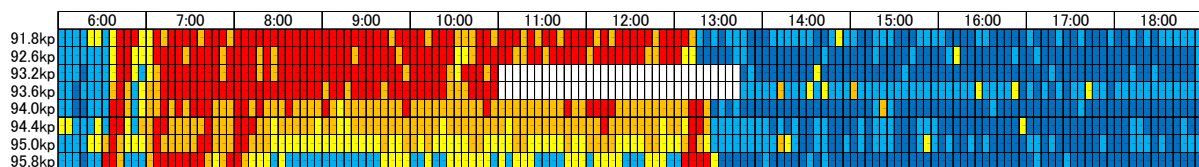




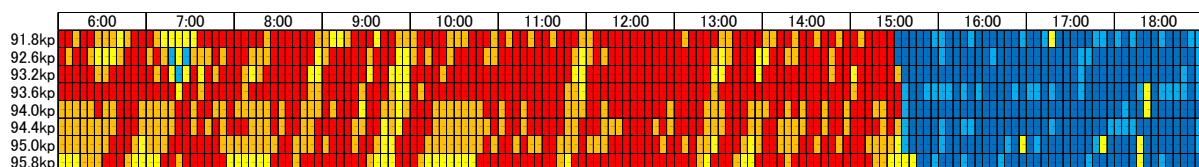
附録 2.33 1995 年 8 月 9 日 5 分間平均走行速度コンター図



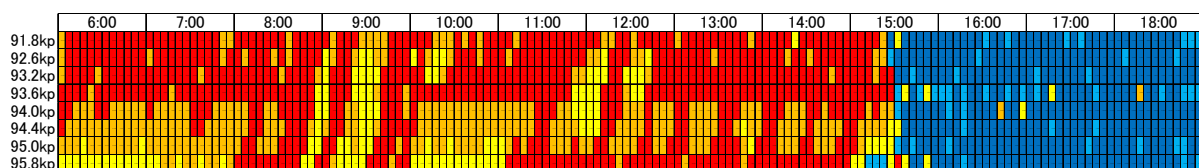
附録 2.34 1995 年 8 月 10 日 5 分間平均走行速度コンター図



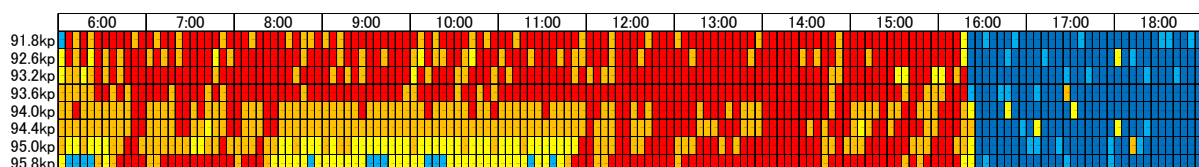
附録 2.35 1995 年 8 月 11 日 5 分間平均走行速度コンター図



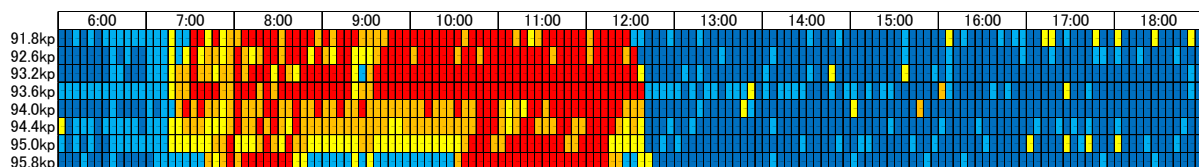
附録 2.36 1995 年 8 月 12 日 5 分間平均走行速度コンター図



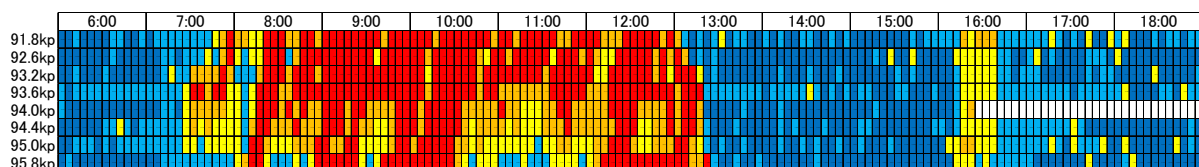
附録 2.37 1995 年 8 月 13 日 5 分間平均走行速度コンター図



附録 2.38 1995 年 8 月 14 日 5 分間平均走行速度コンター図

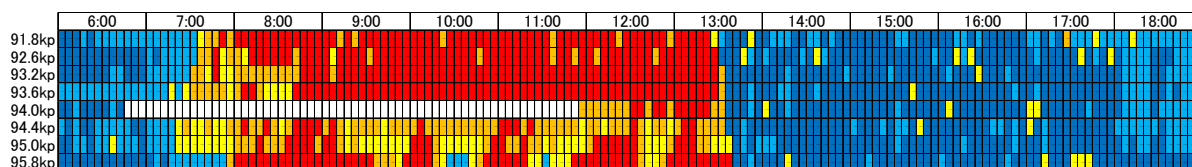


附録 2.39 1995 年 8 月 15 日 5 分間平均走行速度コンター図

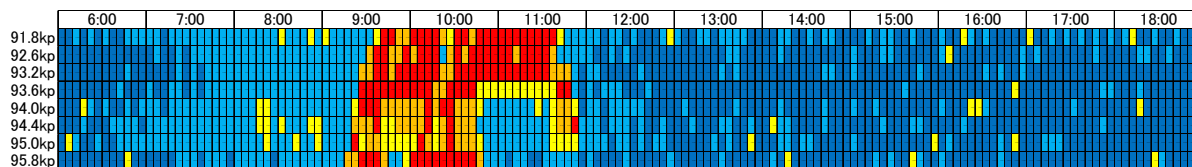


附録 2.40 1995 年 8 月 16 日 5 分間平均走行速度コンター図

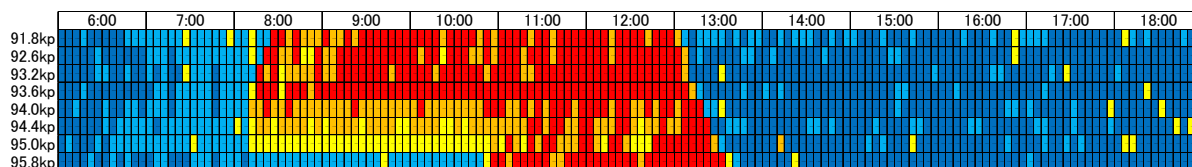




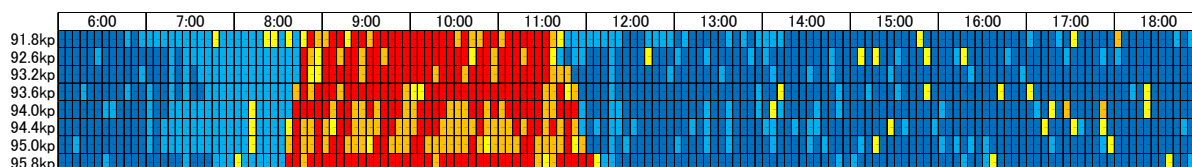
附録 2.41 1995 年 8 月 17 日 5 分間平均走行速度コンター図



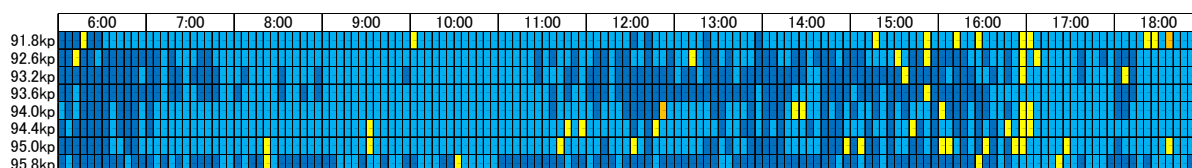
附録 2.42 1995 年 8 月 18 日 5 分間平均走行速度コンター図



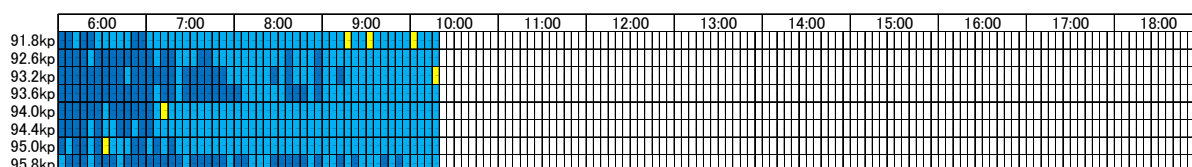
附録 2.43 1995 年 8 月 19 日 5 分間平均走行速度コンター図



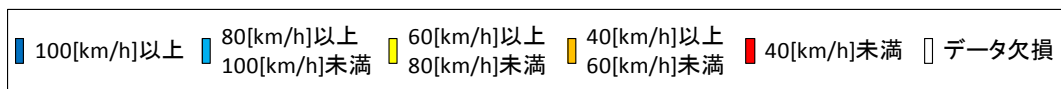
附録 2.44 1995 年 8 月 20 日 5 分間平均走行速度コンター図



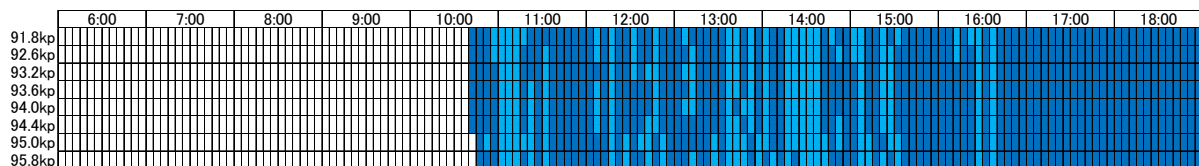
附録 2.45 1995 年 8 月 21 日 5 分間平均走行速度コンター図



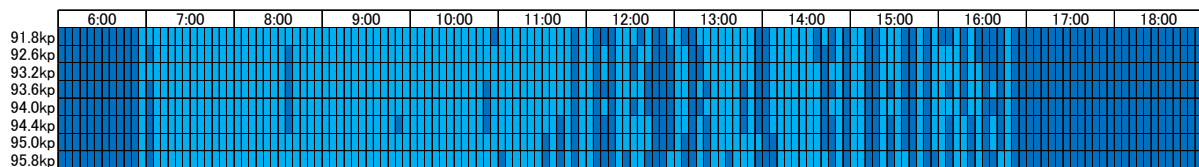
附録 2.46 1995 年 8 月 22 日 5 分間平均走行速度コンター図



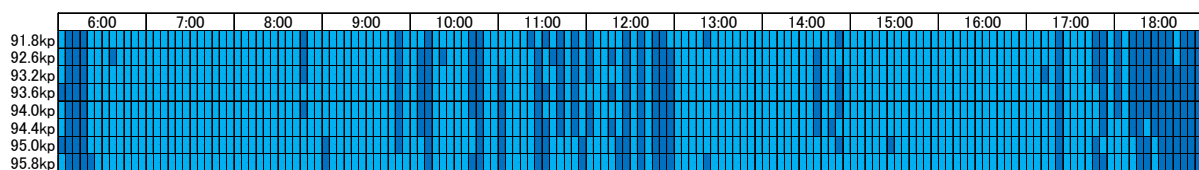
附録 3 東北自動車道下り線 5 分間交通量コンター図



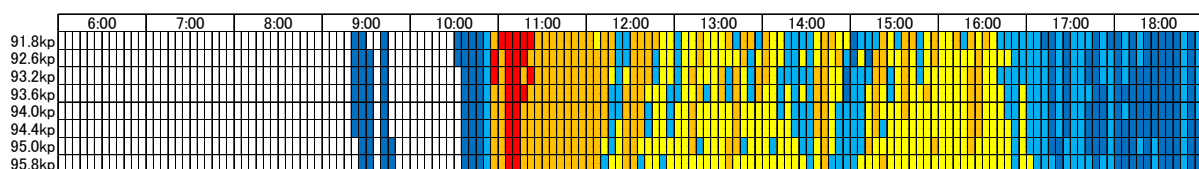
附録 3.1 1994 年 12 月 26 日 5 分間交通量コンター図



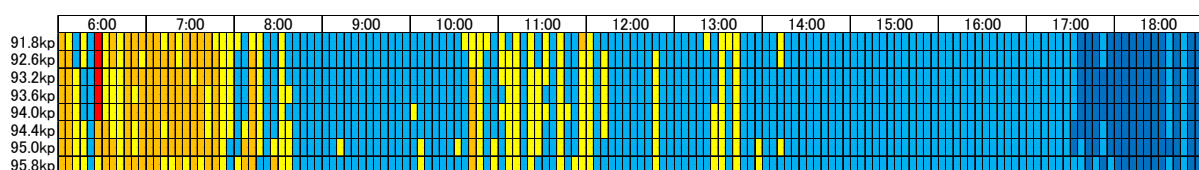
附録 3.2 1994 年 12 月 27 日 5 分間交通量コンター図



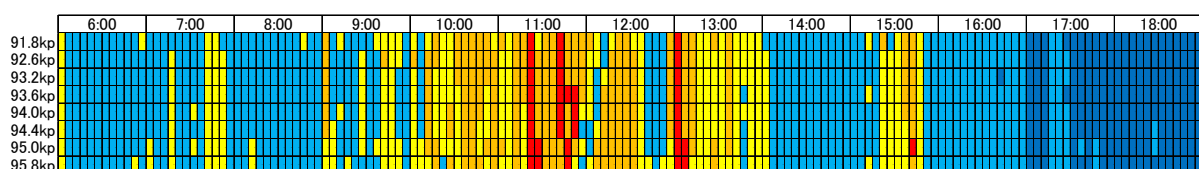
附録 3.3 1994 年 12 月 28 日 5 分間交通量コンター図



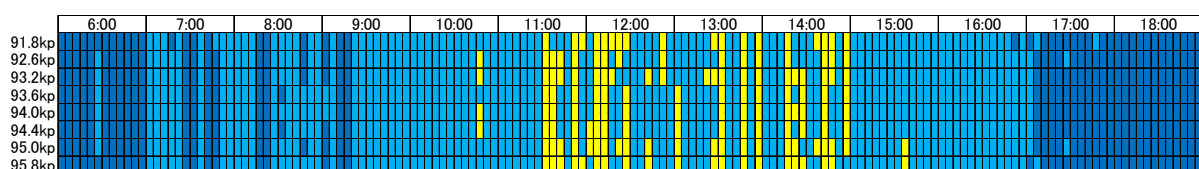
附録 3.4 1994 年 12 月 29 日 5 分間交通量コンター図



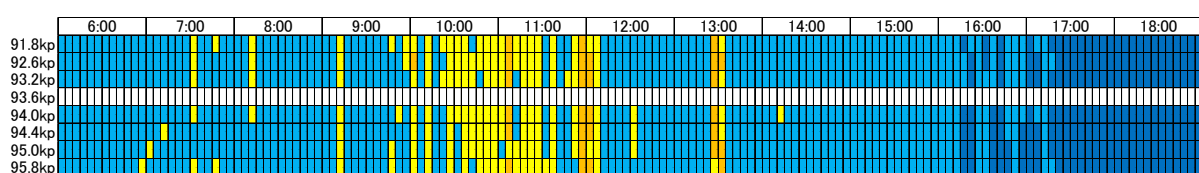
附録 3.5 1994 年 12 月 30 日 5 分間交通量コンター図



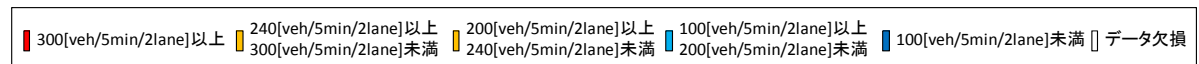
附録 3.6 1994 年 12 月 31 日 5 分間交通量コンター図

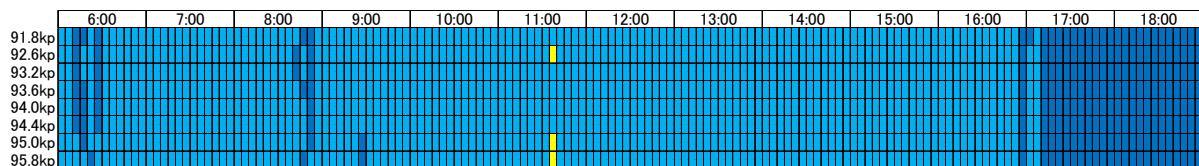


附録 3.7 1995 年 1 月 1 日 5 分間交通量コンター図

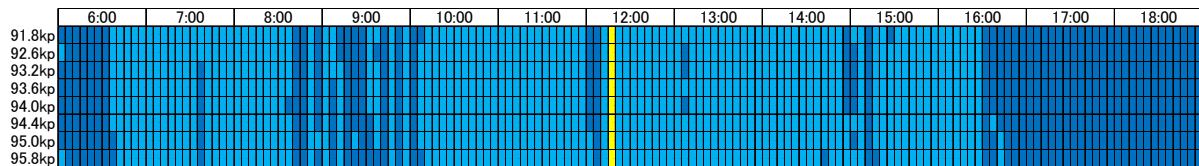


附録 3.8 1995 年 1 月 2 日 5 分間交通量コンター図

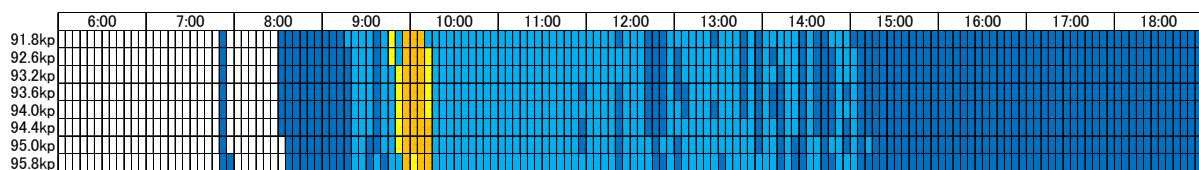




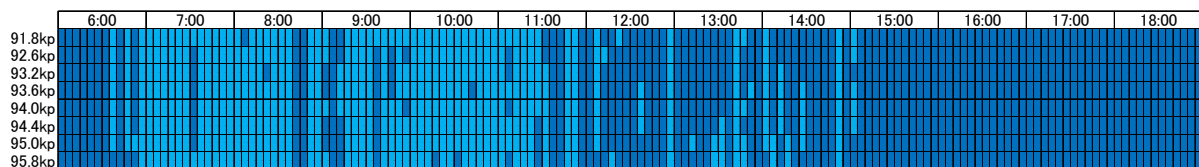
附録 3.9 1995 年 1 月 3 日 5 分間交通量コンター図



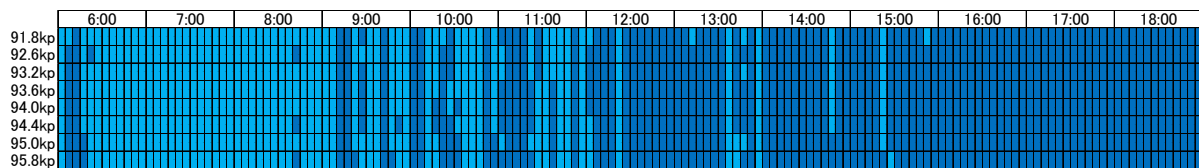
附録 3.10 1995 年 1 月 4 日 5 分間交通量コンター図



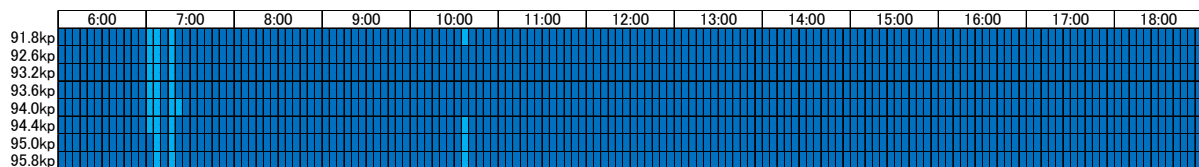
附録 3.11 1995 年 1 月 5 日 5 分間交通量コンター図



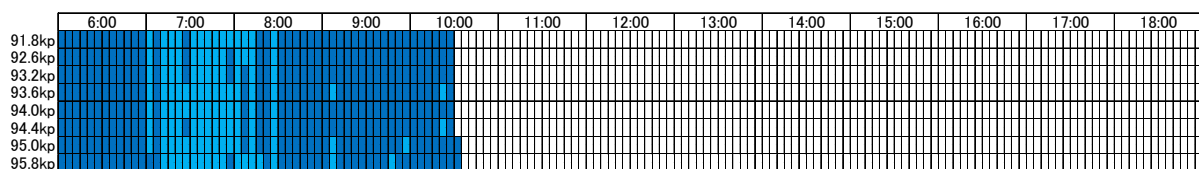
附録 3.12 1995 年 1 月 6 日 5 分間交通量コンター図



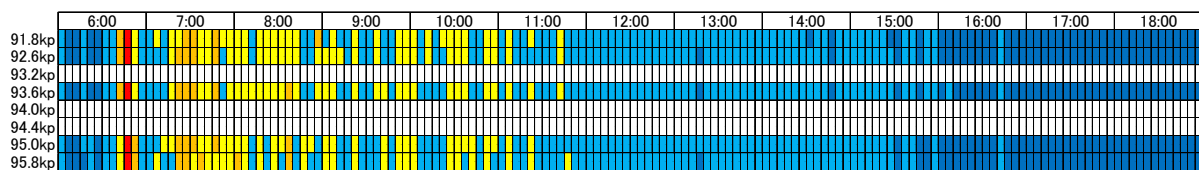
附録 3.13 1995 年 1 月 7 日 5 分間交通量コンター図



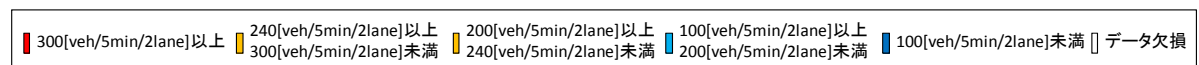
附録 3.14 1995 年 1 月 8 日 5 分間交通量コンター図

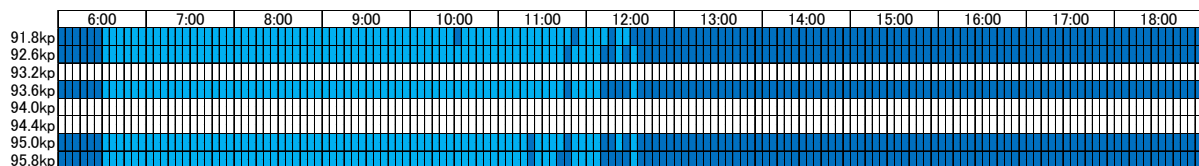


附録 3.15 1995 年 1 月 9 日 5 分間交通量コンター図

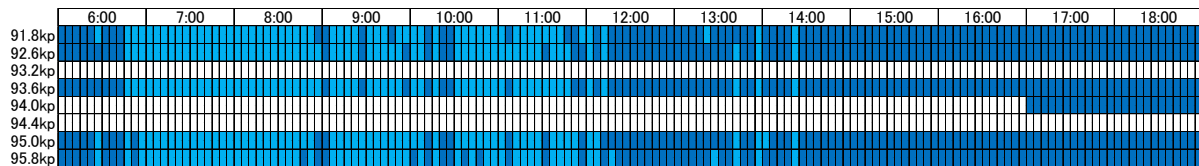


附録 3.16 1995 年 4 月 22 日 5 分間交通量コンター図

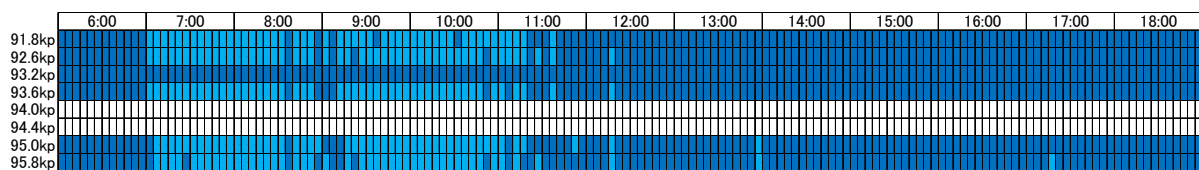




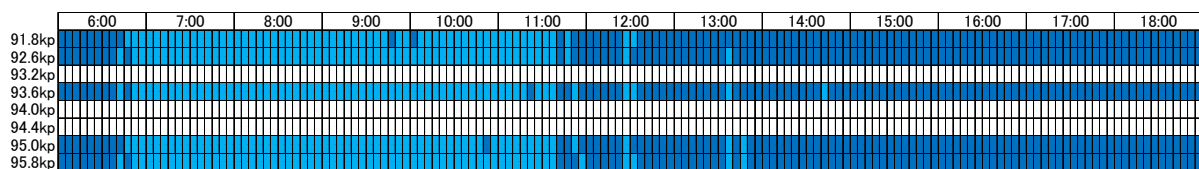
附録 3. 17 1995 年 4 月 23 日 5 分間交通量コンター図



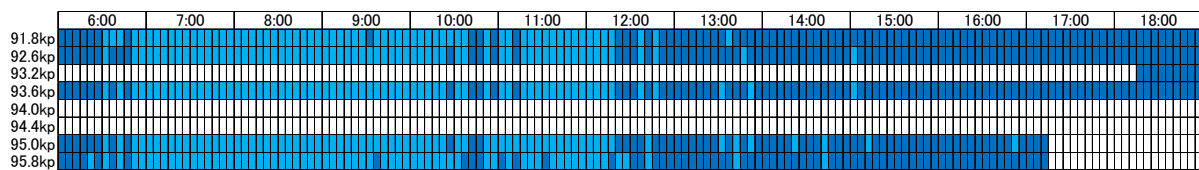
附録 3. 18 1995 年 4 月 24 日 5 分間交通量コンター図



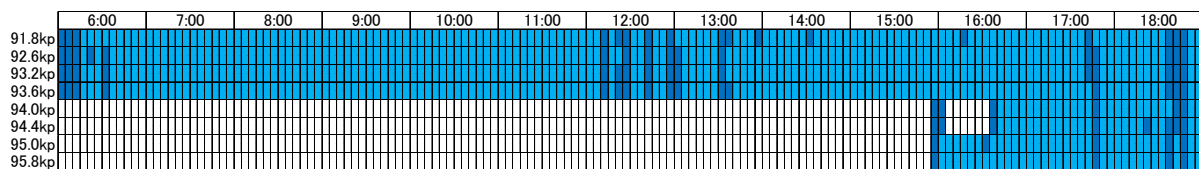
附録 3. 19 1995 年 4 月 25 日 5 分間交通量コンター図



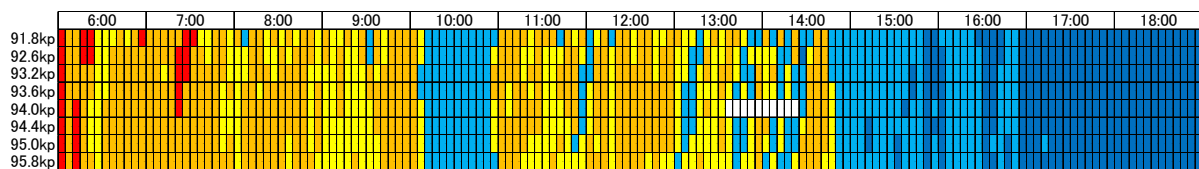
附録 3. 20 1995 年 4 月 26 日 5 分間交通量コンター図



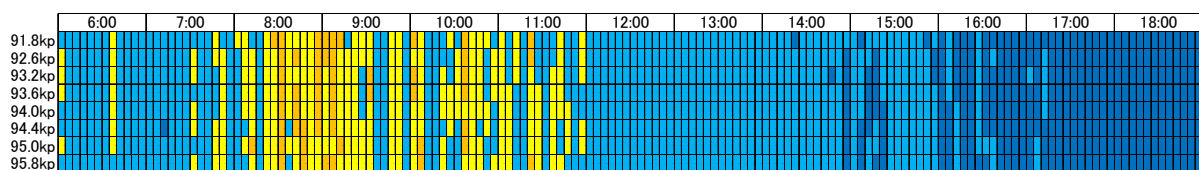
附録 3. 21 1995 年 4 月 27 日 5 分間交通量コンター図



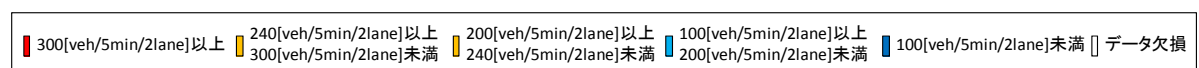
附録 3. 22 1995 年 4 月 28 日 5 分間交通量コンター図

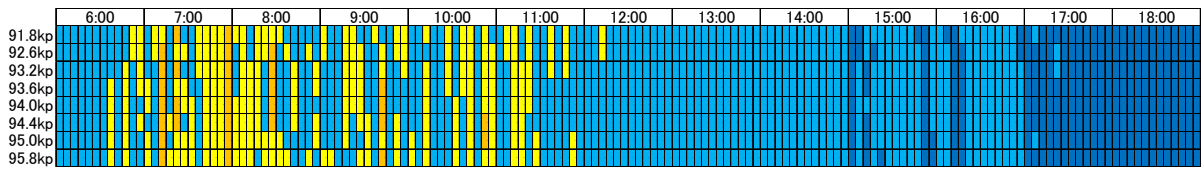


附録 3. 23 1995 年 4 月 29 日 5 分間交通量コンター図

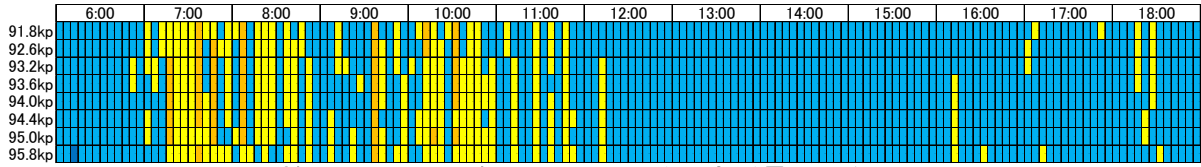


附録 3. 24 1995 年 4 月 30 日 5 分間交通量コンター図

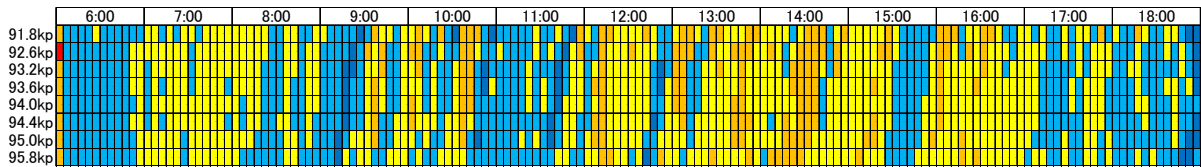




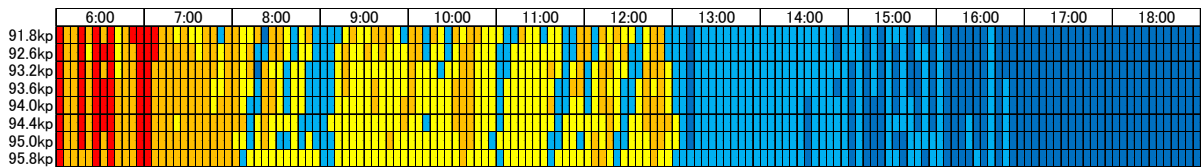
附録 3.25 1995 年 5 月 1 日 5 分間交通量コンター図



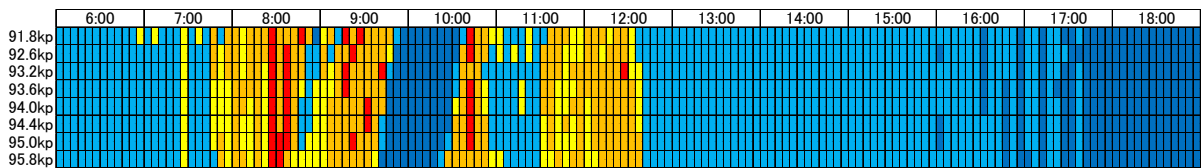
附録 3.26 1995 年 5 月 2 日 5 分間交通量コンター図



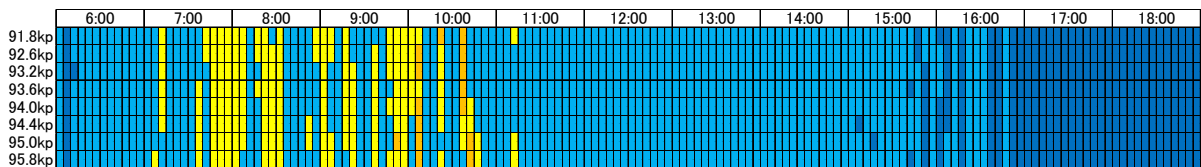
附録 3.27 1995 年 5 月 3 日 5 分間交通量コンター図



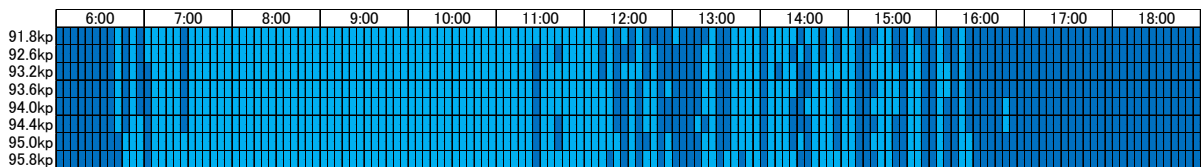
附録 3.28 1995 年 5 月 4 日 5 分間交通量コンター図



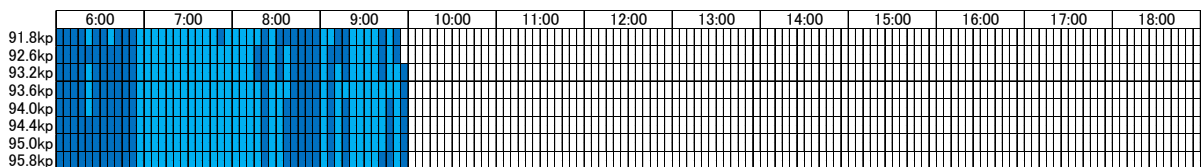
附録 3.29 1995 年 5 月 5 日 5 分間交通量コンター図



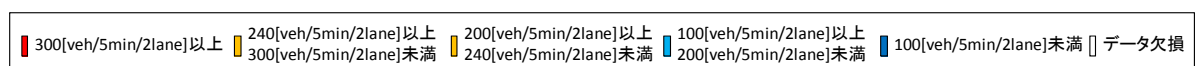
附録 3.30 1995 年 5 月 6 日 5 分間交通量コンター図

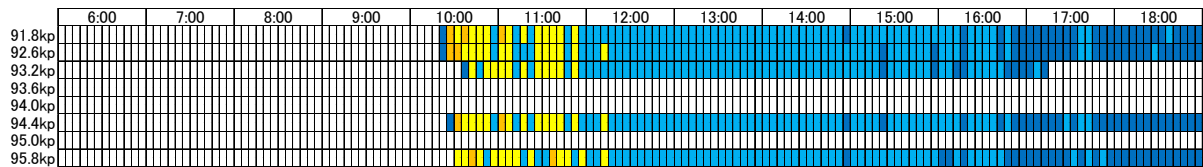


附録 3.31 1995 年 5 月 7 日 5 分間交通量コンター図

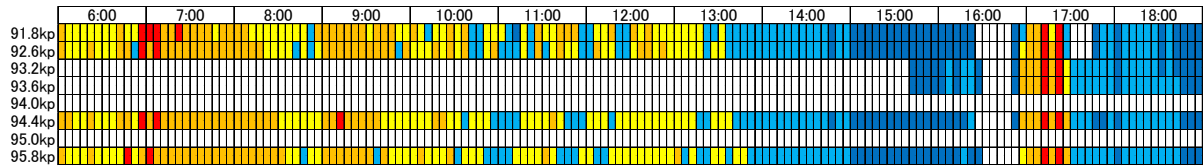


附録 3.32 1995 年 5 月 8 日 5 分間交通量コンター図

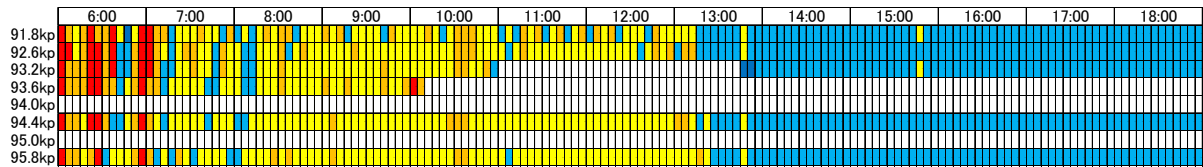




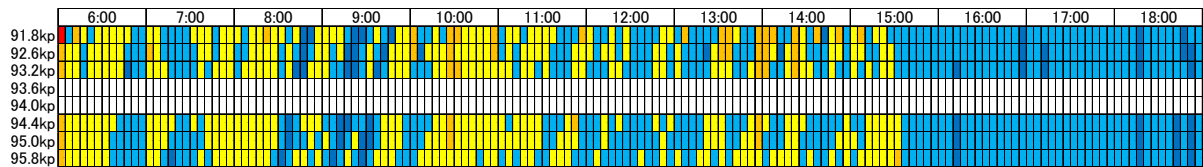
附録 3.33 1995 年 8 月 9 日 5 分間交通量コンター図



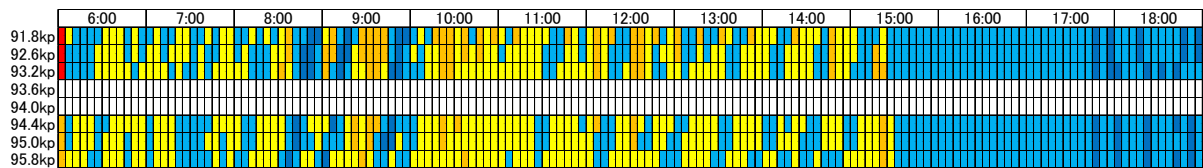
附録 3.34 1995 年 8 月 10 日 5 分間交通量コンター図



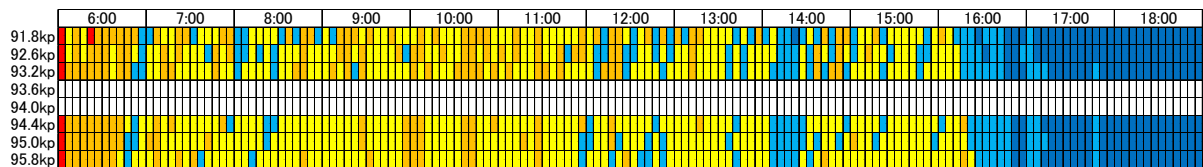
附録 3.35 1995 年 8 月 11 日 5 分間交通量コンター図



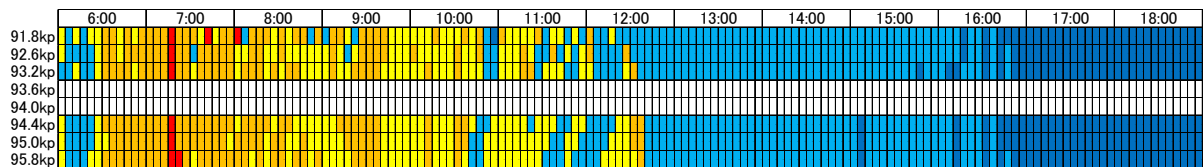
附録 3.36 1995 年 8 月 12 日 5 分間交通量コンター図



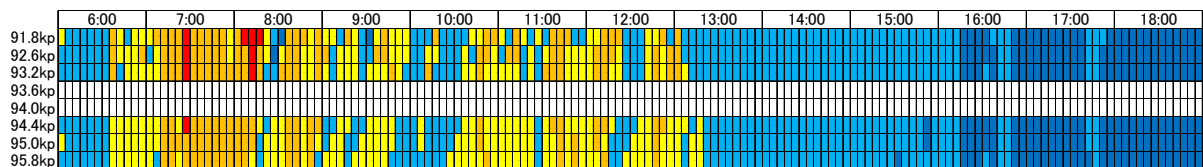
附録 3.37 1995 年 8 月 13 日 5 分間交通量コンター図



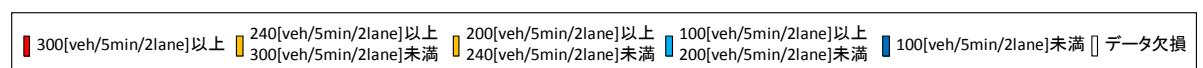
附録 3.38 1995 年 8 月 14 日 5 分間交通量コンター図

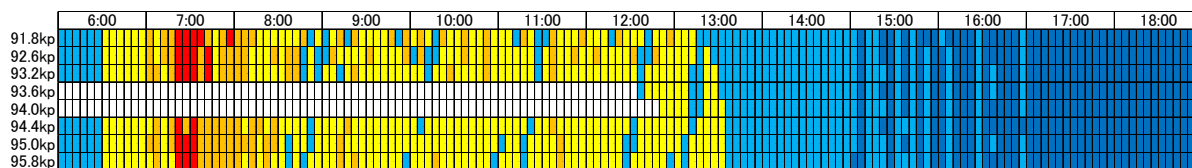


附録 3.39 1995 年 8 月 15 日 5 分間交通量コンター図

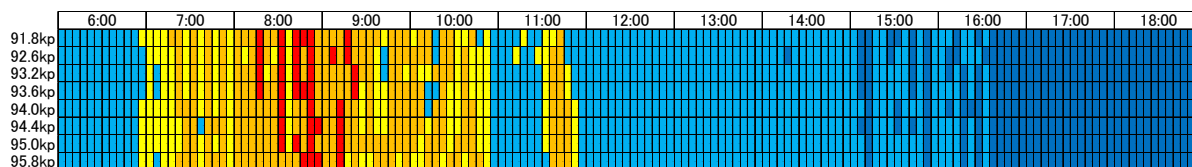


附録 3.40 1995 年 8 月 16 日 5 分間交通量コンター図

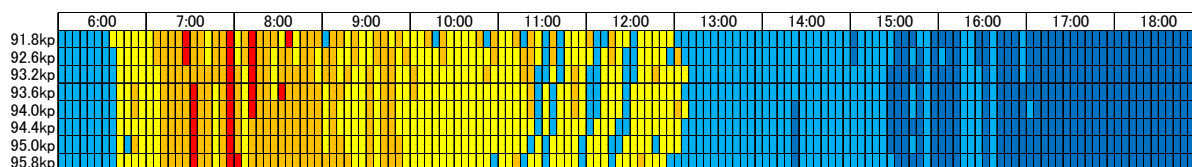




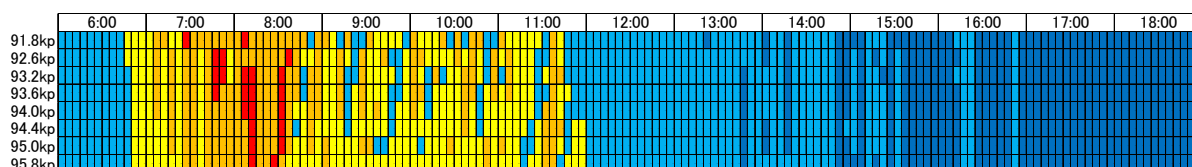
附録 3. 41 1995 年 8 月 17 日 5 分間交通量コンター図



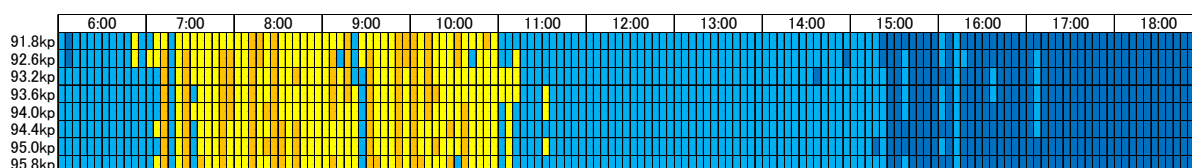
附録 3. 42 1995 年 8 月 18 日 5 分間交通量コンター図



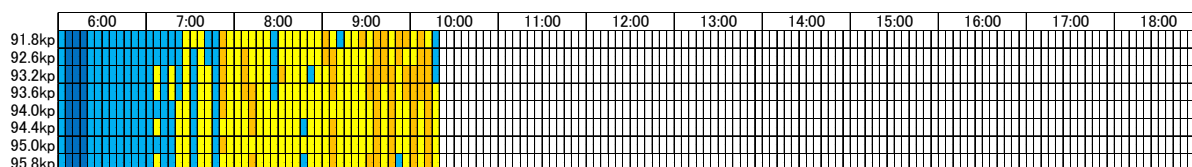
附録 3. 43 1995 年 8 月 19 日 5 分間交通量コンター図



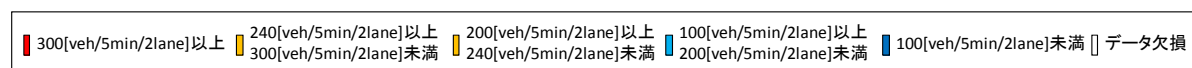
附録 3. 44 1995 年 8 月 20 日 5 分間交通量コンター図



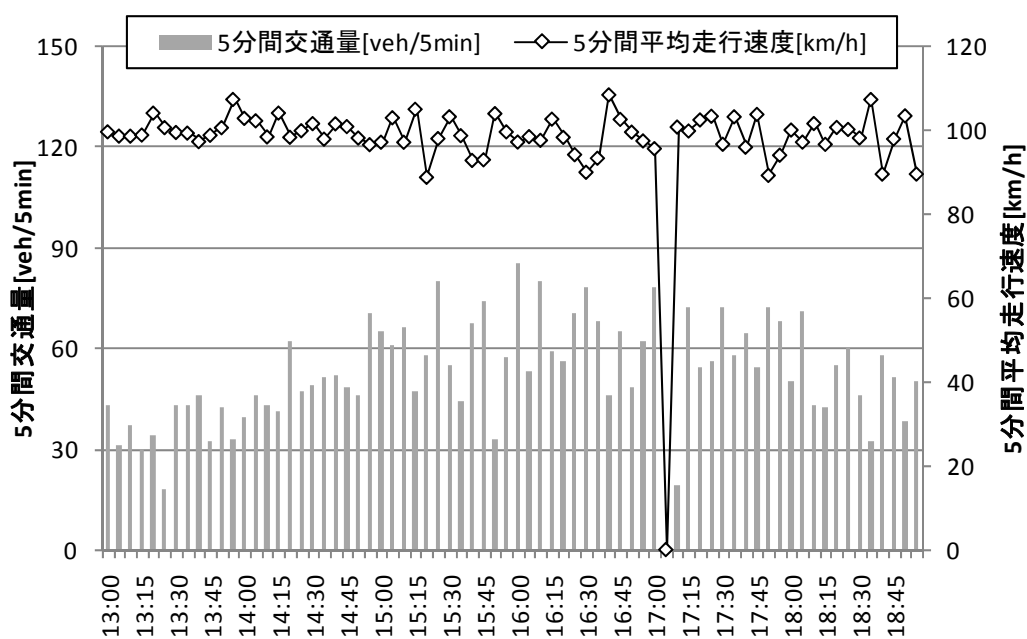
附録 3. 45 1995 年 8 月 21 日 5 分間交通量コンター図



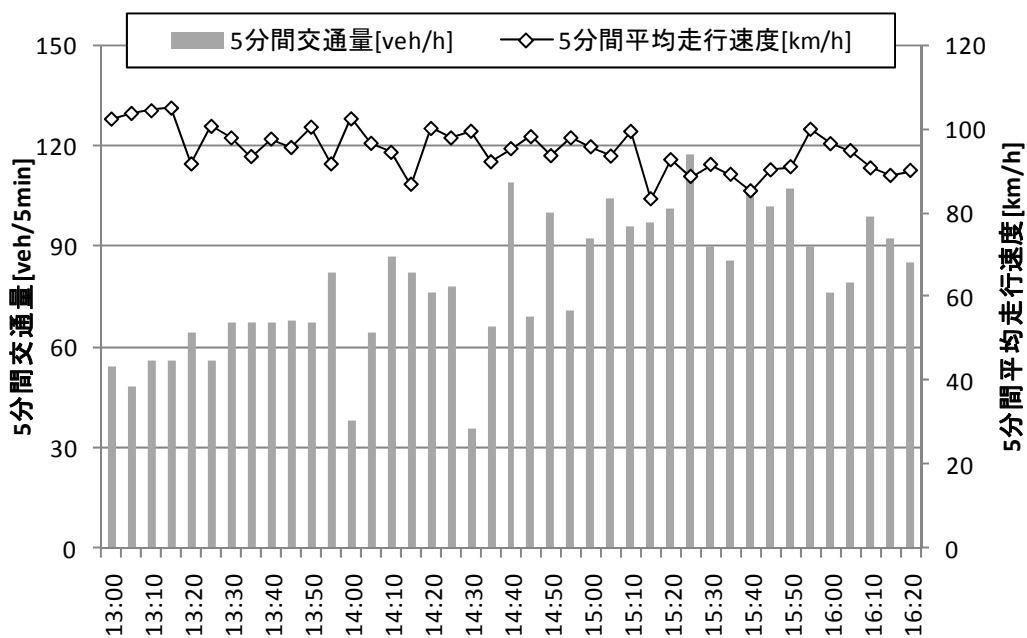
附録 3. 46 1995 年 8 月 22 日 5 分間交通量コンター図



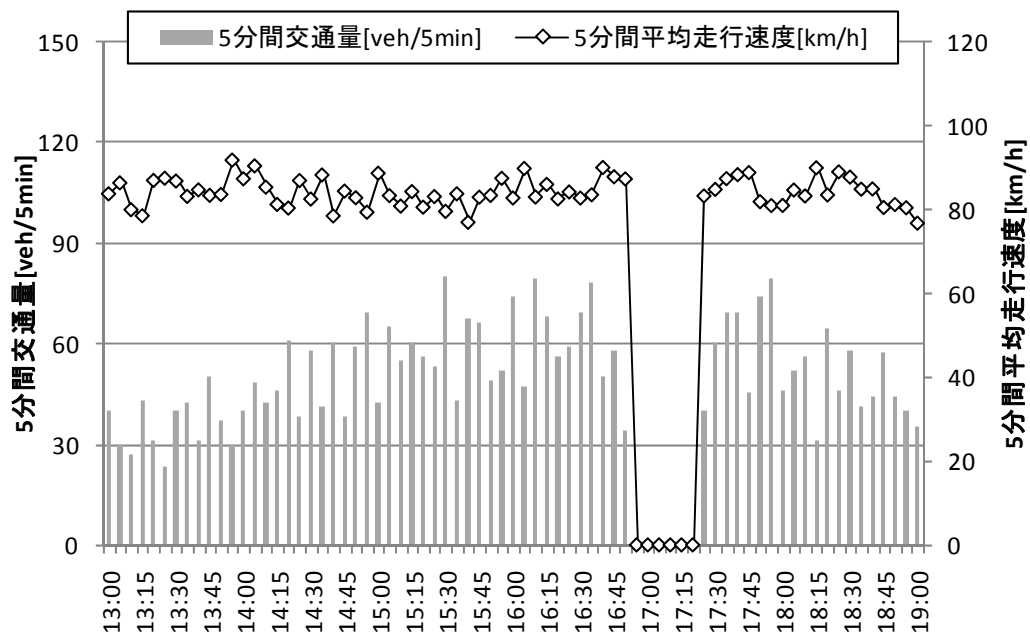
附録 4 東海北陸自動車道上り線 5 分間交通量速度変動図



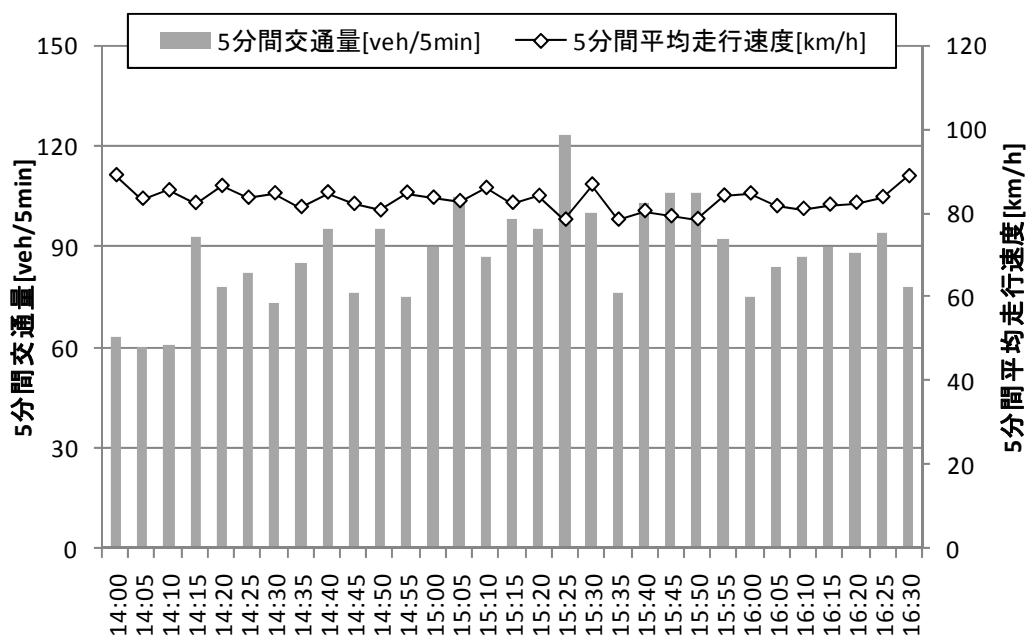
附録 4. 1 東海北陸自動車道上り線 74. 7kp 地点 (2004 年 7 月 18 日)



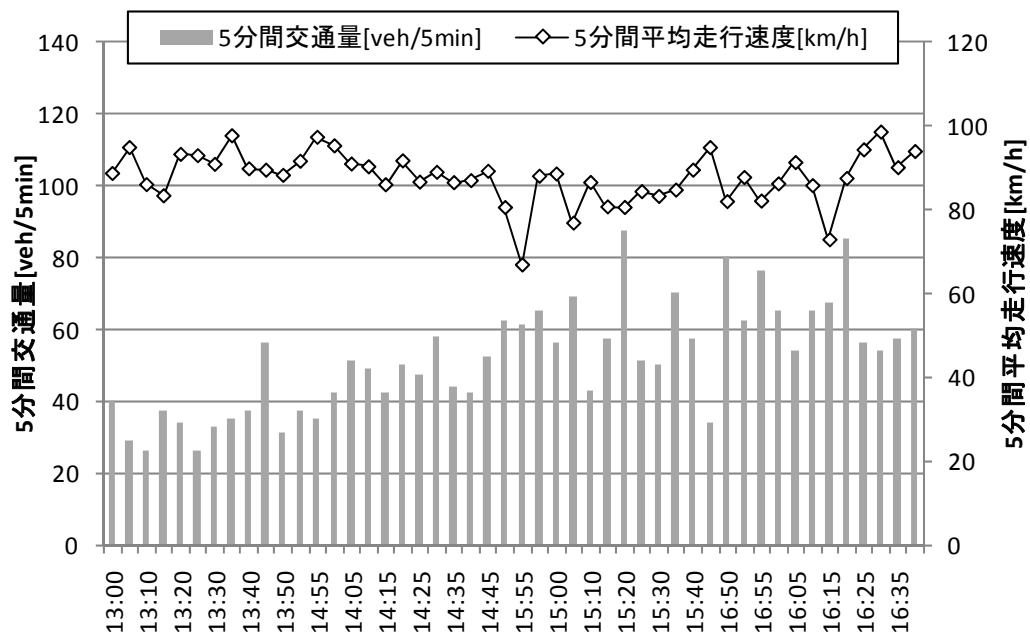
附録 4. 2 東海北陸自動車道上り線 74. 7kp 地点 (2004 年 7 月 19 日)



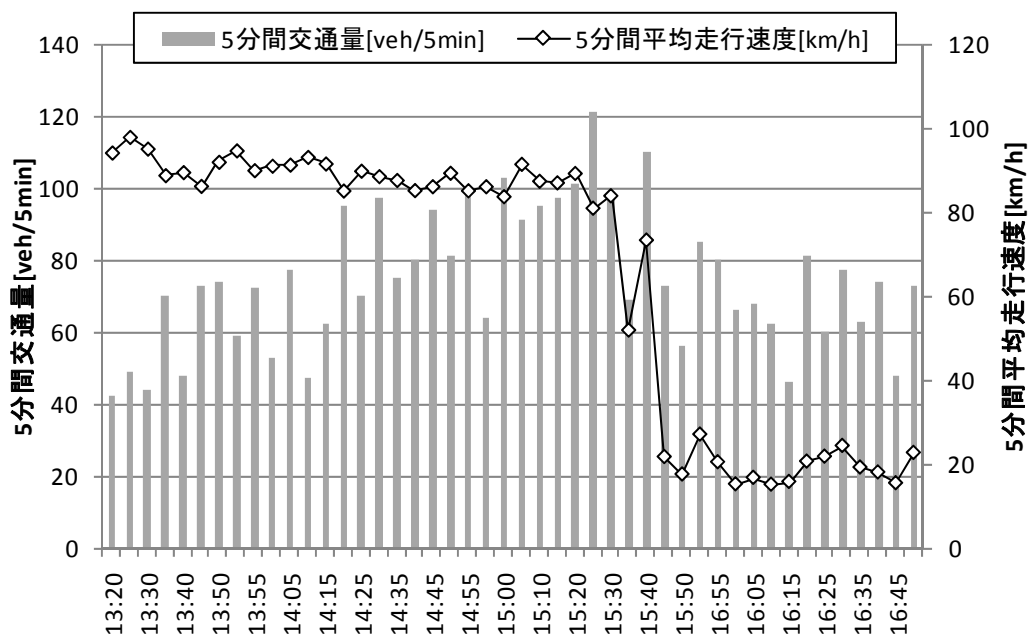
附録 4.3 東海北陸自動車道上り線 72.6kp 地点 (2004 年 7 月 18 日)



附録 4.4 東海北陸自動車道上り線 72.6kp 地点 (2004 年 7 月 19 日)



附録 4.5 東海北陸自動車道上り線 70.4kp 地点 (2004 年 7 月 18 日)



附録 4.6 東海北陸自動車道上り線 70.4kp 地点 (2004 年 7 月 19 日)